www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

12e JAARGANG No. 2, blz. 33-64 FEBRUARI 1950

# Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

## DE PHILIPS ELECTRONENMICROSCOOP VOOR 100 kV

door A. C. van DORSTEN, H. NIEUWDORP en A. VERHOEFF.

621.385.833

*De electronenmicroscoop mag zich, zoals nauwelijks enig ander instrument, verheugen in de belangstelling van beoefenaars van vrijwel alle natuurwetenschappen: de physicus — schepper van de electronenoptica, die aan het instrument ten grondslag ligt — ziet in de uitwerking van de analogie met de lichtmicroscoop een fraaie exemplificatie van de gedachte van het golfkarakter der materiële deeltjes; de bioloog, de chemicus, de medicus, de metallurg en vele anderen zullen het instrument willen gebruiken; de ingenieur ten slotte beleeft bij de practische uitvoering een opeenhoping van heterogene technische problemen, die een uitdaging zijn (of mogen we al zeggen: waren?) voor zijn vindingrijkheid.*

### Grondgedachten van de ontwikkeling

De stap van de lichtmicroscopie naar de electronenmicroscopie heeft de mensheid een heel stuk verder gebracht in de kennis van het zeer kleine: kan de lichtbundel in het uiterste geval slechts objecten ter grootte van ongeveer 0,2 micron (2000 ångström) onderscheidbaar maken, de electronenbundel heeft reeds objecten van 10 à 20 ångström zichtbaar gemaakt en ons daarmee diep doen doordringen in de fijne structuur der technisch toegepaste materialen, in de wereld der bacteriën en virussen, ja zelfs in het gebied der grote moleculen, terwijl nog slechts een betrekkelijk kleine en misschien niet onoverbrugbare afstand ons scheidt van het gebied der afzonderlijke atomen (orde van grootte 1 ångström).

Ondanks de reeds behaalde successen kan men wel zeggen dat de electronenmicroscopie nog in de kinderschoenen staat. Een symptoom hiervan is het feit dat het instrument waarmee gewerkt wordt nog zo'n belangrijk gedeelte van de aandacht van de onderzoeker opeist. Het maken van werkelijk goede beelden met de electronenmicroscoop — beelden waarbij het onderste uit de kan wordt gehaald wat betreft het scheidend vermogen, het contrast enz. — lijkt daardoor thans nog haast meer op een kunst dan op een vak.

Als we nu de grondgedachte van de electronenmicroscoop die door Philips in de afgelopen jaren is ontwikkeld en thans in productie is gebracht, kort willen omschrijven, kunnen we zeggen dat bij de constructie van dit instrument het streven voorop heeft gestaan het werken met de electronenmicroscoop zoveel mogelijk te vergemakkelijken. Vervolmaking en automatisering van de hulpapparatuur, stelselmatig uit de weg ruimen van bronnen van mogelijke fouten, vèr-gaande vereenvoudiging van alle handelingen nodig bij de bediening van het instrument, geven de onderzoeker enerzijds de mogelijkheid zeer goede beelden te produceren als routinewerk, en dit in een fractie van de tijd die met vroegere apparaten voor het verkrijgen van een beeld nodig was, terwijl anderzijds, als men voorzorgen in acht neemt die meer tijd en bekwaamheid vergen, ware topprestaties mogelijk zijn.

Als uitgangspunt voor de ontwikkeling van de Philips electronenmicroscoop heeft gediend het fundamentele werk dat is verricht door Le Poole en medewerkers in het Instituut voor Electronenmicroscopie te Delft. Een experimentele microscoop die het resultaat was van dat werk, is drie jaar geleden in dit tijdschrift beschreven [1]).

[1]) J. B. Le Poole, Een nieuw electronenmicroscoop met continu regelbare vergroting, Philips techn. T. **9**, 33-46, 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 1. De Philips electronenmicroscoop voor 100 kV (type no. 11980). De microscoopbuis is in schuine stand op een lessenaar geplaatst. De lessenaar, die uit drie compartimenten van gegoten aluminium is samengesteld, bevat in het linker compartiment het pompaggregaat, in het rechter het voedingsapparaat voor de lenzen en alle overige electronische apparatuur, en in het midden, onder de microscoopbuis, de hoogspanningsgenerator, terwijl op het paneeltje onder het cirkelvormige waarnemingsscherm en aan weerskanten van de buis diverse bedieningsknoppen, contrôlemeters enz. zijn aangebracht.

**De samenstelling van het instrument**

Het instrument bevat vier hoofdgedeelten:

1) de microscoopbuis, met o.a. de electronenbron, de electronenlenzen — die van het magnetische type zijn —, de praeparaathouder, het waarnemingsscherm en de inrichting voor het fotograferen;
2) een systeem van pompen voor het evacueren van de microscoopbuis;
3) een hoogspanningsgenerator, die de spanning levert waarmee de electronen worden versneld;
4) de apparatuur voor de bekrachtiging van de electronenlenzen.

Dit alles, met de nodige schakelinrichtingen, leidingen enz., is ondergebracht in een soort lessenaar, waarvan in *fig. 1* een foto en in *fig. 2* een doorsneetekening is te zien. De microscoopbuis is in schuine stand op de lessenaar aangebracht. Het opwaarts gerichte einde van de buis is afgesloten met een vlakke glazen plaat (16 mm dik, om bij geëvacueerde buis de luchtdruk van 1 atmosfeer te kunnen weerstaan). Aan de binnenzijde van deze plaat is het fluorescerende scherm, van 20 cm diameter, aangebracht, waarop het vergrote beeld van het object ontstaat; dit beeld wordt door het glas heen waargenomen.

Bij de nu volgende bespreking van de verschillende onderdelen zullen wij ons het langst hebben bezig te houden met de microscoopbuis zelf; maar ook de constructieprincipes, toegepast in de hulpapparaten, verdienen enige aandacht. Een slotparagraaf zal een kort overzicht bevatten van bijzonderheden in de bediening van het instrument — niet om daarmee een gebruiksaanwijzing te geven, doch om te doen zien in hoeverre men in de verwezenlijking van de, hierboven uitgestippelde, opzet is geslaagd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



## De microscoopbuis

*Principes van het electronenoptische systeem*

De beeldvorming met een electronenoptisch systeem, in het bijzonder met magnetische electronenlenzen, is in het aangehaalde artikel in dit tijdschrift [1]) uitvoerig besproken, zodat we hier met een herhaling van de belangrijkste punten willen volstaan.

Op het te onderzoeken praeparaat werpt men een bundel electronen, die door een gloeidraad zijn geëmitteerd en door een hoge spanning versneld. Verschillende gedeelten van het praeparaat verzwakken de bundel in verschillende mate, en wel door meer of minder sterke verstrooiing van de electronen. De verdergaande bundel, die het beeld van de structuur van het praeparaat in zich draagt, doorloopt het veld van een electronenlens, waardoor het vlak van het praeparaat (voorwerpsvlak) sterk vergroot op een verderop gelegen vlak

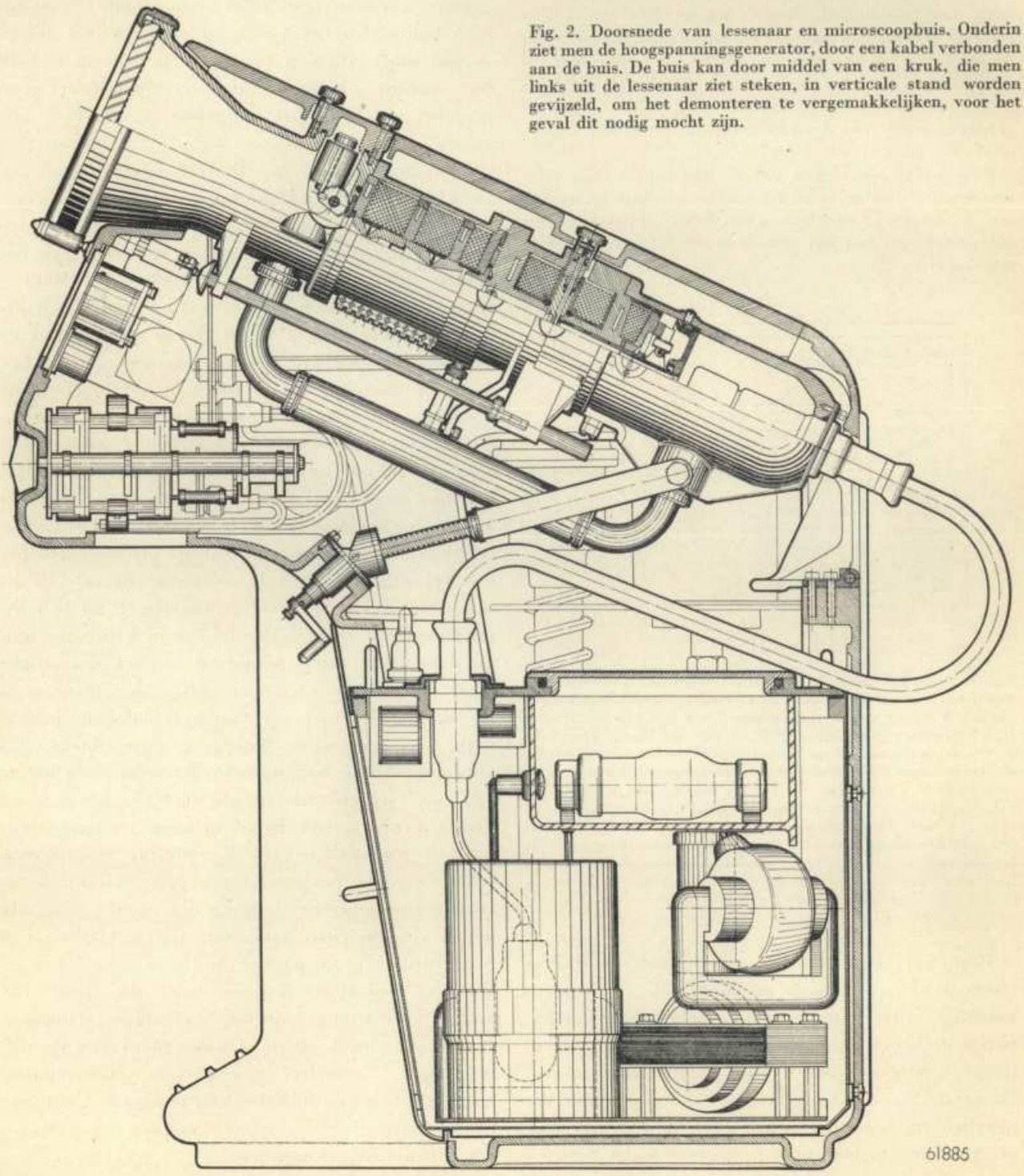



Fig. 2. Doorsnede van lessenaar en microscoopbuis. Onderin ziet men de hoogspanningsgenerator, door een kabel verbonden aan de buis. De buis kan door middel van een kruk, die men links uit de lessenaar ziet steken, in verticale stand worden gevijzeld, om het demonteren te vergemakkelijken, voor het geval dit nodig mocht zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



(beeldvlak) wordt afgebeeld. Met een fluorescentiescherm in het beeldvlak kan men het beeld zichtbaar maken; men kan echter ook het beeld eerst nog verder vergroten met een tweede en eventueel nog meerdere electronenlenzen. Zeer gebruikelijk is een constructie met twee lenzen (tweetrapsmicroscoop), waarvan men de eerste de objectieflens, de tweede de projectorlens noemt.

Een magnetische electronenlens wordt gevormd door het inhomogene magnetische veld in een korte spoel. Voor een sterke lens (kleine brandpuntsafstand) heeft men sterke velden nodig, bijv. van de orde van 0,6 Wb/m² (6000 gauss). Men verkrijgt deze door de spoel een groot aantal ampèrewindingen te geven en ze, op een ringvormige spleet na, geheel door een ijzeren mantel te omhullen. Om het veld nog meer te concentreren, plaatst men aan weerskanten van de splect een ringvormig poolstuk van geschikt profiel in de opening van de spoel; zie *fig. 3*.

Bij redelijke afmetingen van de lens bereikt men aldus brandpuntsafstanden van 3 à 4 mm, en men kan dan werken met een vergroting van de orde van 100×. Door verandering van de bekrachtiging kan men de brandpuntsafstand van de lens variëren.

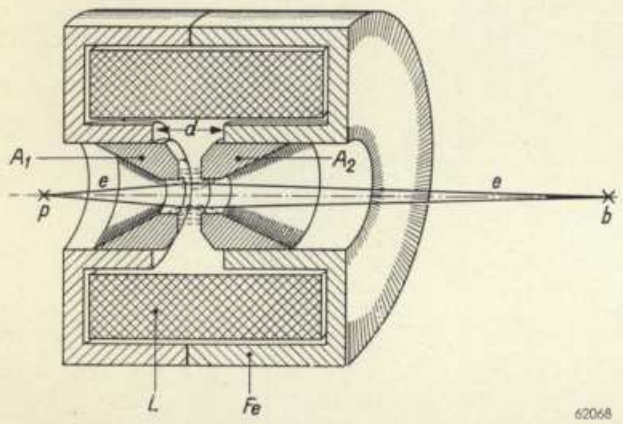



Fig. 3. Magnetische electronenlens. *L* spoel; *Fe* ijzeren mantel met ringvormige spleet *d*; $A_1$, $A_2$ poolstukken; *e* electronenbundel. Van een voorwerp in *p* wordt een beeld gevormd in *b*. De electronen moeten natuurlijk in vacuum lopen. Ten einde de te evacueren ruimte zo klein mogelijk te houden, wordt de ringspleet door opvullen met een niet-magnetisch materiaal vacuumdicht afgesloten. — De electronen lopen in feite niet volgens stralen als hier getekend: zij krijgen in het magneetveld nog een cirkelende beweging, loodrecht op de as, zodat een schroefvormige baan resulteert. Dit is van belang bij het beschouwen van mogelijke afbeeldingsfouten, doch het kan hier buiten beschouwing blijven. Ook bij de volgende figuren is er daarom geen rekening mee gehouden.

Het electronenoptische systeem van de Philips electronenmicroscoop is in hoofdzaak op overeenkomstige wijze samengesteld als dat van het experimentele instrument van Le Poole. Dit systeem bevat niet twee, maar vijf magnetische lenzen. De eerste hiervan fungeert als condensor, voor het „verlichten" van het praeparaat, de tweede is de objectieflens, de laatste de projectorlens. De derde en vierde worden aangeduid als diffractielens en tussenlens; deze worden nooit tegelijk ingeschakeld.

De tussenlens maakt het mogelijk een sterke totale vergroting te bereiken (in ons geval 60 000×) zonder dat de vergroting van elk der drie meewerkende lenzen afzonderlijk overmatig groot behoeft te zijn; dit heeft vooral het voordeel dat de microscoop betrekkelijk kort blijft (de totale lengte van de microscoopbuis is 81 cm). Bovendien echter kan men, door veranderen van de bekrachtiging van de tussenlens, de vergroting continu binnen wijde grenzen variëren (van 4000× tot 60 000×) terwijl toch het beeldscherm van 20 cm diameter geheel gevuld blijft. Bij een tweetrapsmicroscoop is zulk een continue variatie van de vergroting niet goed mogelijk, zoals in het aangehaalde artikel [1]) uitvoerig is toegelicht.

Door inschakeling van de diffractielens — een zwakke lens met wijde boring — maken we de vergroting kleiner dan die van objectief en projector tezamen, en we bestrijken zodoende ook het gebied van vergrotingen van 1000× tot 4000×, waarmee de gewenste aansluiting aan de lichtmicroscoop verkregen wordt. Haar naam dankt de diffractielens hieraan dat zij een zeer eenvoudige methode mogelijk maakt om van het beschouwde gedeelte van het praeparaat een electronendiffractiediagram te ontwerpen. Hiertoe regelt men de bekrachtiging van deze lens zodanig dat niet het beeldvlak van de objectieflens doch haar aan de beeldzijde gelegen brandvlak wordt afgebeeld in het voorwerpsvlak van de projectorlens (en dus vervolgens op het fluorescentiescherm). In dit brandvlak ontstaat namelijk, analoog als bij de lichtmicroscoop, volgens de theorie van v. Abbe, het buigingsspectrum van de structuur van het praeparaat. Voor de normale waarneming van een beeld is in de stralenloop, niet ver van het bedoelde brandvlak, een zeer nauw diafragma aangebracht, dat alleen de eerste buigingsmaxima behorende bij de „grove" structuurdetails doorlaat, welke maxima voor een contrastrijke beeldvorming van deze details moeten meewerken. Bij het diffractie-onderzoek echter wil men het, veel verder van de optische as verwijderde, eerste buigingsmaximum van elk detail van de fijne structuur (rangschikking van moleculen en atomen) zelf zichtbaar maken; het genoemde objectiefdiafragma moet dus door een ander, veel wijder, worden vervangen. Overigens echter zijn, dank zij de aanwezigheid van de diffractielens, generlei mechanische manipulaties nodig en men kan derhalve van het beeld van een praeparaatgedeelte in enkele seconden overgaan tot het diffractiediagram ervan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



In *fig. 4* is de loop der electronenstralen in de drie verschillende situaties — sterke vergrotingen, zwakke vergrotingen, diffractie-onderzoek — schematisch aangegeven. De wijdte van de lensboringen en de breedte van de electronenbundel is daarbij duidelijkheidshalve sterk overdreven getekend: in

De scherpstelinrichting bestaat in ons geval uit twee afbuigspoelen, aangebracht tussen de condensorlens en het praeparaat. Tijdens de waarnemingen zijn deze spoelen buiten actie, doch voor het scherp stellen worden zij bekrachtigd met een wisselstroom van 50 Hz. Daardoor wordt de

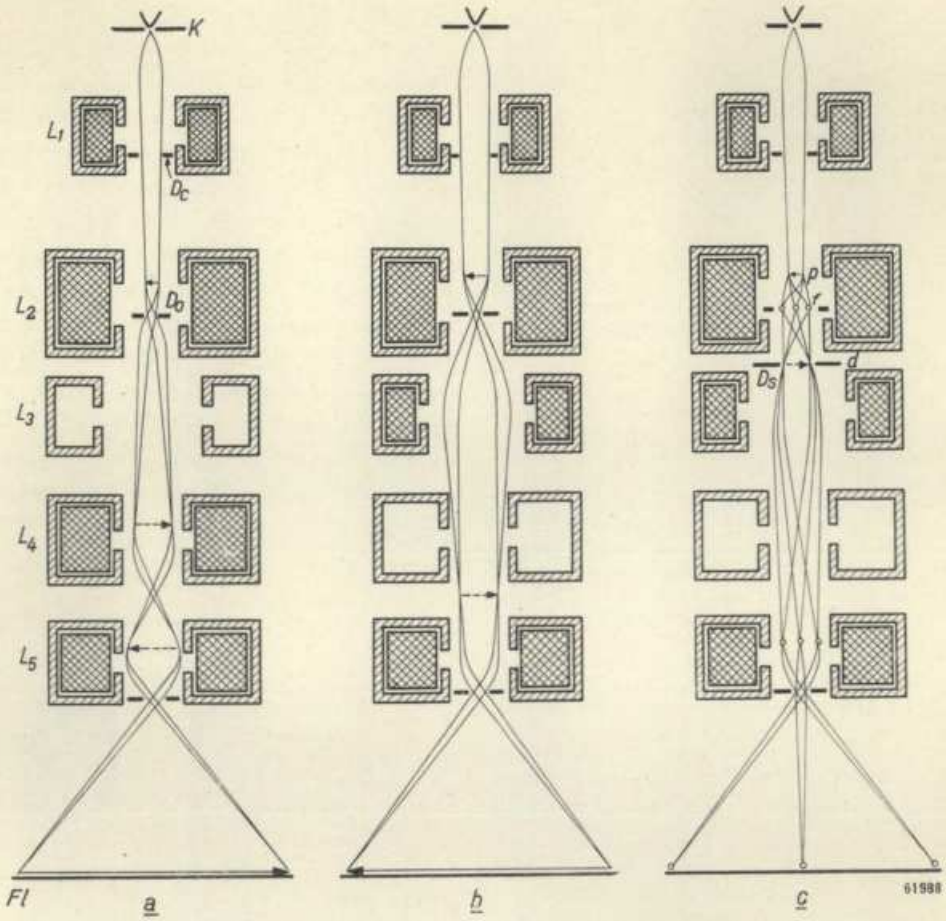



Fig. 4. Schematische voorstelling van de loop der electronenstralen in de Philips electronenmicroscoop, die vijf lenzen bevat: $L_1$ condensor, $L_2$ objectief, $L_3$ diffractielens, $L_4$ tussenlens, $L_5$ projector; $K$ electronenbron, $Fl$ fluorescentiescherm. De wijdte van de lensboringen en de breedte van de electronenbundel zijn duidelijkheidshalve sterk overdreven getekend. $D_c$, $D_o$, $D_s$ zijn diverse, later te bespreken diafragma's.
*a*) Situatie bij sterke vergroting (4000-60 000×); diffractielens onbekrachtigd.
*b*) Bij zwakke vergroting (1000-4000×); tussenlens onbekrachtigd.
*c*) Bij diffractie-onderzoek. Niet het voorwerpsvlak *p*, maar het aan de beeldzijde gelegen brandvlak *f* van het objectief wordt op het scherm afgebeeld. In het vlak *d* ontstaat een tussenbeeld van *p*.

werkelijkheid verwijderen zich de electronen tot in de projectorlens nergens meer dan ca 1 mm van de as en worden zij pas bij het passeren van die lens onder grote hoeken afgebogen, om het fluorescentiescherm te vullen.

Behalve het principe van de tussenlens en diffractielens zijn aan Le Poole nog twee andere belangrijke vindingen te danken, die in onze electronenmicroscoop zijn verwerkt en die we bij deze gelegenheid meteen willen bespreken: de scherpstelinrichting, en de manier waarop het beeld fotografisch wordt vastgelegd.

electronenbundel periodiek afgebogen, zodanig dat hij het praeparaat weliswaar steeds in hetzelfde op de as van de buis gelegen plekje blijft treffen, doch onder een hoek die met een frequentie van 50 Hz van grootte en richting verandert; zie *fig. 5*. Dit komt neer op het tijdelijk gebruiken van een bundel met veel grotere apertuur dan gewoonlijk (1/100 radiaal, tegen normaal ongeveer 1/1000 radiaal). De beeldonscherpte, die wordt veroorzaakt door een kleine afwijking tussen het praeparaat en het voorwerpsvlak van de objectieflens, wordt door de grotere apertuur veel geprononceerder; gaat

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



men de bekrachtiging van de objectieflens variëren, om het voorwerpsvlak naar het praeparaat toe te schuiven, dan heeft men dus nu in het minimaal worden van de onscherpte een duidelijk criterium

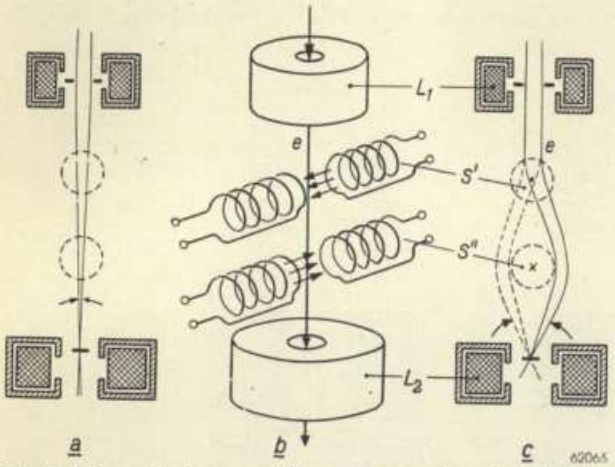



Fig. 5. Schematische voorstelling van de scherpstelinrichting. Tussen condensor $L_1$ en objectief $L_2$ zijn twee spoeltjes $S'$, $S''$ aangebracht, die twee, onderling tegengestelde, magneetvelden loodrecht op de electronenbundel $e$ opwekken ($b$). Normaal zijn de spoeltjes onbekrachtigd; de bundel loopt recht door en heeft een zeer kleine openingshoek ($a$). Bij bekrachtiging van de spoeltjes met een gelijkstroom wordt de bundel door $S'$ afgebogen en door $S''$ teruggebogen, zodanig dat hij het praeparaat in hetzelfde punt treft als voordien ($c$, getrokken stralen). Tijdens het scherp stellen bekrachtigt men de spoeltjes met wisselstroom van 50 Hz; de bundel valt dan afwisselend van rechts en van links op het praeparaat (gestippelde stralen), hetgeen aequivalent is met verlichting door een bundel met veel grotere openingshoek dan normaal.

voor het samenvallen van deze beide. Vooral bij de sterkste vergrotingen, waarbij de beelden op het fluorescentiescherm tamelijk lichtzwak worden, is het scherp stellen met de trillende bundel een groot gemak.

Voor het fotografisch vastleggen van een beeld laat men de electronenbundel rechtstreeks op het fotografisch materiaal vallen. Volgens de methode van Le Poole wordt als fotografisch materiaal rolfilm gebruikt en wordt de film tussen het scherm en de projectorlens gebracht, vrij dicht bij de lens. Zodoende krijgt men foto's van veel kleiner formaat dan het beeld op het fluorescentiescherm, hetgeen een besparing in filmkosten, vermindering van nodige archiefruimte, enz. meebrengt, terwijl tevens door de grotere concentratie van de beschikbare electronenenergie een relatief korte belichtingstijd voldoende is. De foto's bekijkt men later desgewenst met een flinke optische vergroting; dank zij de fijne korrel van de film komt daarbij het scheidend vermogen van de electronenmicroscoop nog ten volle tot zijn recht.

De methode is mogelijk dank zij de kleinheid van de relatieve opening waarmee de projectorlens wordt gebruikt: de individuele bundeltjes die ieder één beeldpunt op het scherm geven, zijn zo nauw dat een verbazend grote scherptediepte wordt verkregen. Het beeld is scherp van enige cm achter het centrum van de projectorlens tot aan het scherm toe en zou dit zelfs vele meters verder dan het scherm ook nog zijn.

*De electronenbron*

De electronen worden geleverd door een V-vormige gloeidraad van wolfraam, waar omheen een metalen kap is geplaatst met een uittree-opening van ca 1 mm diameter; zie *fig. 6*. Dit geheel wordt op een hoge negatieve spanning (40-100 kV) gebracht ten opzichte van het metalen, geaarde, omhulsel van de microscoopbuis. Het verhitten van de gloeidraad geschiedt door een voor 100 kV geïsoleerde, op het net aangesloten gloeistroomtransformator. De electronen die uit het gaatje van de kathodekap treden, worden door het heersende potentiaalverschil versneld en bewegen zich, dank zij de focusserende werking van het electrische veld ter plaatse, in een nauwe bundel volgens de as van de buis.

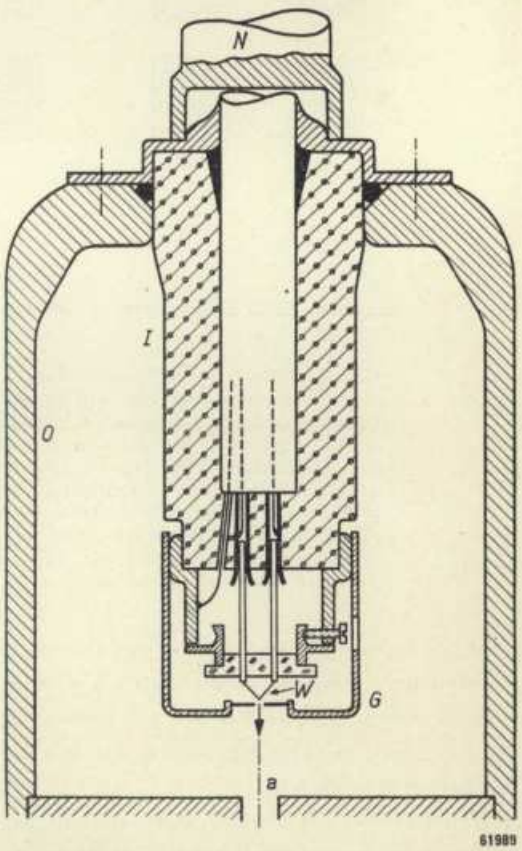



Fig. 6. Constructie van de electronenbron (vereenvoudigd). $W$ gloeidraad, $G$ metalen kap met kleine opening, waardoor de electronen uittreden. Gloeidraad en kap worden gedragen door de cylindrische isolator $I$ van een speciaal soort „Philite", die vacuumdicht in de kop van het geaarde metalen omhulsel $O$ van de microscoopbuis is gemonteerd. $N$ hoogspanningskabel met rubber isolatie en geaarde mantel, $a$ begin van de eigenlijke microscooptubus.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Het voor een focussering vereiste veldverloop krijgt men doordat aan kathodekap en omhulsel een geschikte vorm is gegeven en doordat de kap op een negatieve spanning van 80-100 V ten opzichte van de gloeidraad wordt gehouden. Dit is bewerkstelligd door de kap rechtstreeks aan de hoogspanningspool te verbinden terwijl tussen deze pool en de gloeidraad een weerstand is geschakeld. Tevens heeft men op deze wijze een zelfregelende werking van de geëmitteerde electronenstroom: de kap, welke als stuurrooster fungeert, wordt bij toenemende emissiestroom sterker negatief ten opzichte van de gloeidraad, waardoor de toeneming van de stroom wordt tegengewerkt (principe van de tegengekoppelde triode). We zullen nog zien dat deze regelwerking van groot belang is voor de constructie van de hoogspanningsgenerator. De emissiestroom waarmee normaal wordt gewerkt, bedraagt 10-20 μA. Hiervan komt slechts een minieme fractie, bijv. $10^{-10}$ A of nog minder, op het fluorescentiescherm aan het andere eind van de microscoopbuis terecht.

Ten gevolge van de plaatselijk relatief hoge temperatuur van de gloeidraad moet deze bij normaal gebruik van de electronenmicroscoop alle paar dagen worden vernieuwd. Dit gaat zeer eenvoudig, doordat de gloeidraad is gemonteerd op een voetje van poederglas met ingeperste stekerpennen, dat gemakkelijk in de houder kan worden gezet resp. er uitgetrokken. Om de gloeidraad te kunnen bereiken, klapt men een deksel dat dit einde van de microscoopbuis beschermt omlaag, maakt de schroefverbinding van de kop van het omhulsel los en trekt de electronenbron naar buiten (*fig.* 7). Elke gloeidraad is van te voren op zijn voet gecentreerd, zodanig dat de punt van de V na goed inzetten van de steker automatisch op de goede plaats in de opening van de kathodekap komt te staan. Zo nodig kan, na het weer opzetten van de kap, de stand van de punt nog gecorrigeerd worden door de houder van de gloeidraad met drie stelschroeven iets te verschuiven.

*De lenzen en diafragma's*

De in de kathoderuimte van de microscoopbuis gevormde electronenbundel treedt de tubus van het electronenoptische systeem binnen. Hier doorloopt hij eerst de condensorlens. Deze, betrekkelijk zwakke, lens concentreert de bundel in meerdere of mindere mate op het praeparaat. De brandpuntsafstand kan worden geregeld tussen 30 en 2,5 cm. De openingshoek van de op het praeparaat vallende electronenbundel varieert tussen 0,002 en 0,00015 radiaal. Een diafragma in de condensor, 0,3 mm wijd, begrenst de wijdte van de bundel. Is het kathode-einde van de microscoopbuis geopend (fig. 7), dan kan met een speciaal stuk gereedschap het condensordiafragma gemakkelijk uit de condensor worden gehaald voor eventuele reiniging.

De volgende lens is de objectieflens, een sterke lens, met een brandpuntsafstand van ca 4,5 mm. Volgens de gebruikelijke constructie geeft men deze lens twee poolstukken die elkaar tot

Fig. 7. Het verwisselen van de gloeidraad. De er afgenomen kathodekap ziet men, boven de hand, op de lessenaar staan.

1 à 2 mm naderen, en die een axiale boring van 1 à 3 mm wijdte bezitten waar doorheen de electronenbundel loopt. Bij onze microscoop echter is de onderlinge afstand der poolstukken zowel als de wijdte van de boring ca 10 mm en zijn de poolstukken overeenkomstig zwaarder gemaakt. De gehele lens is als het ware „opgeblazen", hetgeen in *fig. 8a* en *b* is te zien. Deze wijze van construeren van de objectieflens levert een drietal belangrijke voordelen op. In de eerste plaats wordt de sferische aberratie, die mede een grens stelt aan het scheidend vermogen van de microscoop, in niet onbelangrijke mate kleiner dan bij de normale constructie. Ten tweede kan men ook een andere belangrijke beeldfout, het astigmatisme, zeer sterk beperken, dank zij het feit dat de mechanische bewerking van de boring van 1 cm met kleinere relatieve afwijkingen van de omwente-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



lingssymmetrie kan geschieden dan de bewerking van een boring van 1 à 2 mm, terwijl magnetische inhomogeniteiten in het materiaal van de poolstukken, dank zij de grotere afstand tussen het ijzer en de electronenbundel, als bron van asymmetrie vrijwel geheel zijn uitgeschakeld. Ten derde — en dit

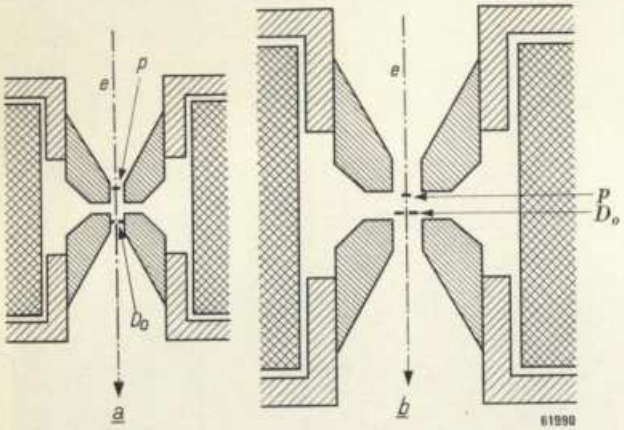



Fig. 8. *a*) Gebruikelijke constructie van de objectieflens. *b*) „Opgeblazen" objectieflens, $e$ = electronenbundel, $p$ = praeparaat, nagenoeg in het voorwerpsbrandpunt, $D_o$ = objectiefdiafragma.

is wegens zijn betekenis voor de constructie wellicht het belangrijkste voordeel —: het voorwerpsbrandpunt, dat bij de normale constructie steeds ergens in de boring van het bovenste poolstuk komt te liggen, bevindt zich thans in de ruimte tussen de beide poolstukken (fig. 8*b*). Het praeparaat, dat in een vlak zeer nabij het voorwerpsbrandpunt moet worden gebracht, kan daardoor met een rechte stang van opzij op zijn plaats worden geschoven, terwijl bij de conventionele constructie altijd een vrij ingewikkeld mechaniek nodig was om het praeparaat boven de objectieflens in de tubus te brengen en het vervolgens op zijn plaats in de boring te laten zakken. Niet alleen wordt de praeparaathouder dus in ons geval veel eenvoudiger, doch ook wordt het nu practisch mogelijk een zeer doeltreffende „praeparaatsluis" te maken, waardoor de tijd nodig voor het verwisselen van het praeparaat en het opnieuw evacueren van de microscoopbuis teruggebracht wordt tot slechts ca 20 seconden. De constructie van de praeparaathouder bespreken wij straks nog nader [2]).

[2]) In theoretische beschouwingen van W. Glaser (Z. Physik **117**, 285, 1941) was reeds de gevolgtrekking gemaakt dat bij de normale constructie van een objectieflens het voorwerpsvlak tussen de poolstukken komt te liggen als men de lens zeer sterk bekrachtigt, en dat dan de sferische aberratie relatief zeer gering wordt. Bij de normale constructie stuit men dan echter op de moeilijkheid dat bij een zo sterke bekrachtiging magnetische verzadiging van de poolstukken zou optreden. Dit is bij de „opgeblazen" constructie, met de hiervoor nodige bekrachtiging, niet het geval.

Het objectiefdiafragma wordt eveneens in de ruimte tussen de poolstukken van de objectieflens geplaatst (fig. 8*b*). Zoals reeds werd vermeld, kunnen twee verschillende diafragma's worden gebruikt, een klein, voor de normale beeldvorming (40 $\mu$), of een groot, voor diffractie-onderzoek (ca 1 mm). Beide diafragma's zijn in een platina plaatje aangebracht, dat weer bevestigd is aan een stangvormige houder die van opzij wordt ingeschoven. Door de houder meer of minder diep naar binnen te schuiven, brengt men het ene dan wel het andere diafragma in de bundel.

De stand van de diafragma's kan zeer gemakkelijk worden gecontroleerd, doordat bij inschakelen van de diffractielens van de microscoop een afbeelding van het kleine diafragma op het scherm kan worden verkregen met een vergroting van ca 200 ×. Ook een eventuele verontreiniging van het diafragma, door deeltjes losgeraakt uit het praeparaat, wordt dan dadelijk zichtbaar. Moet het diafragma gereinigd worden, dan kan men de houder zonder verdere demontage van de microscoop losschroeven en er uittrekken.

In tegenstelling met de conventionele constructies, waarbij het objectiefdiafragma vast is ingebouwd, van buiten onbereikbaar en niet direct controleerbaar, behoeft men dus bij onze microscoop nooit in het onzekere te verkeren omtrent toestand en centrering van het diafragma en kan men wat dit betreft steeds onder optimale condities werken.

Tussen de objectieflens en de daaropvolgende lens, de diffractielens, bevindt zich het vierkante, continu in grootte te variëren, selectiediafragma.

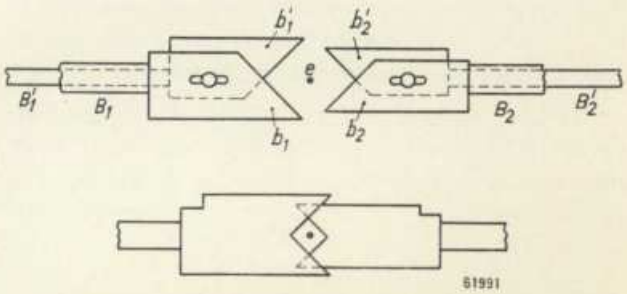



Fig. 9. Schema van de constructie van het selectiediafragma. $e$ = as van de microscoop, loodrecht op het vlak van tekening. Twee vorkvormige stukken kunnen met behulp van stangen $B_1$, $B_2$ meer of minder ver over elkaar heen worden geschoven. De er tussen gelegen vierkante opening varieert daarbij continu in grootte, en kan in zijn geheel naar rechts of links worden verlegd. Ook naar boven of beneden (in het vlak van tekening) kan men de opening verleggen, door met twee andere stangetjes $B_1'$, $B_2'$, die in een axiale boring van de eerstgenoemde stangen glijden, van elke vork één der beide samenstellende, wigvormige plaatjes ($b_1'$, $b_2'$) ten opzichte van het andere ($b_1$, $b_2$) in de stangrichting te verschuiven. Alle vier justeringen geschieden van buiten af, zonder dat het vacuum in de microscoopbuis wordt verstoord; de justering wordt gecontroleerd door het gevormde vierkant op het fluorescentiescherm af te beelden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Hiermee wordt bij het diffractie-onderzoek het gedeelte van het praeparaat uitgezocht waarvan men het diffractiediagram wenst waar te nemen. In het vlak van dit diafragma ontstaat dan nl. een tussenbeeld van het praeparaat; door verkleinen van het diafragma schakelt men dus electronenstralen die van de buitenste delen van het praeparaat uitgaan, van de medewerking bij het vormen van het diffractiebeeld uit. Bij de kleinste bruikbare opening van het diafragma werkt een praeparaatvlakje van 1 $\mu \times 1\ \mu$ mee, bij de grootste opening ca 30 $\mu \times 30\ \mu$. De constructie van het selectiediafragma is in principe weergegeven in *fig. 9*.

Na het passeren van het selectiediafragma doorloopt de electronenbundel nog de diffractielens en de nauwe boringen van tussenlens en projectorlens. Over de functie der verschillende lenzen is hierboven reeds uitgeweid, de constructie ervan biedt geen belangrijke nieuwe gezichtspunten. Voor het afvoeren van de warmte, in de lenzen ontwikkeld door de bekrachtigingsstromen, zijn alle vijf lenzen voorzien van waterkoeling. In *fig. 10* is, als samenvatting van deze beschrijving, een (iets vereenvoudigde) doorsneetekening van de gehele microscooptubus gegeven.

Het is een practisch zeer belangrijk probleem, hoe men er voor zorgen kan a) dat de electronenbundel zonder ergens te raken de vele nauwe openingen op zijn weg zal passeren, b) dat bovendien elke lens nauwkeurig volgens haar as door de bundel wordt doorlopen, ten einde de beeldfouten te vermijden die inhaerent zijn aan scheve stralen ten opzichte van de as (coma, astigmatisme). Dit laatste is vooral van belang voor de objectieflens. De beide eisen komen in de eerste plaats hierop neer dat de assen van alle vijf lenzen exact in één lijn moeten liggen. Bij onze microscoop is hiervoor gezorgd op de volgende wijze. De condensorlens en de twee helften van de objectieflens — deze moet in twee helften worden vervaardigd om de straks te noemen praeparaattafel op haar plaats te kunnen brengen — worden met uiterst nauwkeurig bewerkte passingen aan elkaar gezet. De spoelen van de diffractielens, tussenlens en projectorlens zijn op een gemeenschappelijke ijzeren kerncylinder, met magnetisch isolerende tussenringen, gewikkeld, in welks boring de poolstukken voor alle drie lenzen, met de nodige afstandsringen, worden geschoven (fig. 10). Deze drie lenzen vormen dus een star geheel, dat weer met een passing aan het eerstgenoemde tubusgedeelte wordt verbonden, terwijl het eerste poolstuk van de diffractielens, dat de schakel tussen de twee tubusgedeelten vormt, bij het opbouwen van het instrument door middel van stelschroeven nog kan worden nagejusteerd. De assen der vijf lenzen liggen dan zo precies in elkaars verlengde, dat verdere justering door de gebruiker daar niets aan zou kunnen verbeteren en dus gevoegelijk van het aanbrengen van een mogelijkheid hiertoe kon worden afgezien. In de tweede plaats echter moet er dan voor worden gezorgd dat de binnentredende electronenbundel nauwkeurig volgens de as van de tubus is gericht.

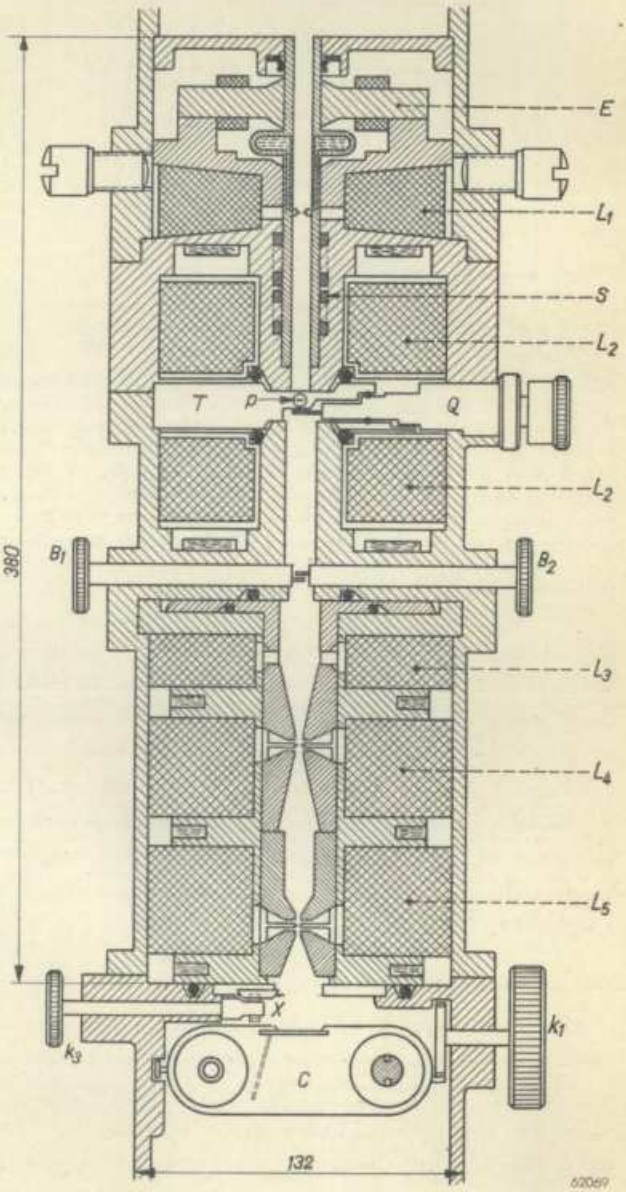



Fig. 10. Doorsneetekening (vereenvoudigd) van de microscooptubus met het uit vijf lenzen bestaande electronenoptische systeem. $L_1$ condensor, $S$ scherpstelinrichting, $L_2$ objectieflens (uit twee gedeelten bestaande), $Q$ houder van objectiefdiafragma. Deze houder, evenals die van het praeparaat $p$, die in deze figuur niet zichtbaar is daar hij loodrecht op het vlak van de doorsnede staat, worden hieronder nog met details afgebeeld (fig. 13). $B_1$, $B_2$ houders van selectiediafragma, $L_3$ diffractielens, $L_4$ tussenlens, $L_5$ projectorlens. $E$ centreerinrichting. ($T$ praeparaattafel, $C$ camera met draaiknop $k_1$, $k_3$ knop voor markeerinrichting $X$; zie in hetgeen volgt.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Aangezien de electronenbron geregeld wordt verwisseld, moet de gebruiker de mogelijkheid hebben de bundel zo nodig opnieuw te centreren. In afwijking van andere uitvoeringen, waarbij door middel van flexibele aansluitingen tussen microscooptubus en electronenbron de laatste in haar

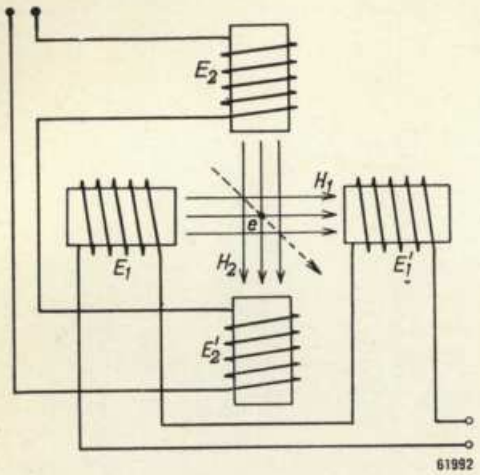



Fig. 11. Schematische voorstelling van de centreerinrichting. $e$ = electronenbundel, loodrecht op het vlak van tekening. De in serie geschakelde spoeltjes $E_1$, $E_1'$ leveren een magnetisch veld $H_1$, de spoeltjes $E_2$, $E_2'$ een veld $H_2$. De electronenbundel wordt door de Lorentz-kracht afgebogen in een richting loodrecht op het resulterende veld ter plaatse van de bundel. Door kleine veranderingen in de bekrachtiging der twee paren spoelen kan men het resulterende veld van sterkte en richting doen veranderen en zodoende de electronenbundel naar elke gewenste richting zo veel als nodig afbuigen.

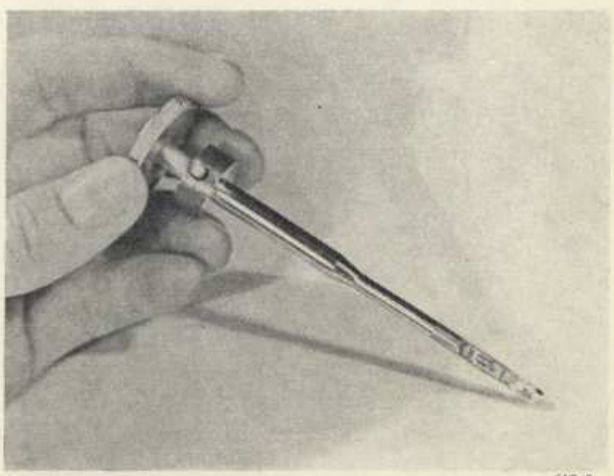
geheel iets kan worden verschoven of gekanteld, hebben wij de, constructief meer aantrekkelijke, weg gekozen de bundel te richten door afbuiging met behulp van een magnetisch veld. Deze centreerinrichting staat in fig. 10 bovenaan ($E$). Zij bestaat in wezen uit twee paar spoelen, waarvan elk paar een dwars op de bundel gericht magnetisch veld levert. In *fig. 11* is de werking nader toegelicht.

*De praeparaathouder*

Het praeparaat wordt aangebracht op een minuscule zilveren drager met een rechthoekige opening, de drager wordt in de eerder vermelde stangvormige praeparaathouder geklemd (*fig. 12*), en de houder wordt gezet in wat men kan noemen de „praeparaattafel". Dit is een vlakke metalen schijf van niet-magnetisch materiaal, die is aangebracht in de ruimte tussen de poolstukken van de objectieflens. Door middel van twee pennen kan de schijf in twee onderling loodrechte richtingen, beide loodrecht op de as van de tubus, ca 1 mm worden verplaatst. Door combinatie van deze twee bewegingen kan men elk gedeelte van het kleine praeparaat in het middelpunt van het voorwerpsvlak brengen en aldus het praeparaat, in zeer gelijkmatige beweging, „afzoeken". Een dichting van de schijf met rubber ringen zorgt dat daarbij het vacuum blijft gehandhaafd. Deze dichting en enige andere constructieve details van de praeparaattafel en -houder (en tevens van de eerder besproken objectiefdiafragmahouder) ziet men in *fig. 13*.

De genoemde pennen worden via twee, aan weerskanten van de microscoopbuis aangebrachte, hefboomstelsels bediend met twee knoppen naast het fluorescentiescherm. Aldus kan men de praeparaattafel verschuiven terwijl men voor de lessenaar zit en het beeld op het scherm gadeslaat. De verschuiving van elke pen is aan een verlicht schaaltje op 1 $\mu$ nauwkeurig af te lezen, zodat men gemakkelijk een bepaald gedeelte van het praeparaat kan terugvinden. Het hefboomstelsel is zo geconstrueerd dat bij eventuele geringe deformaties van de lessenaar (verplaatsingen van de hefboomlagers) geen krachten op de pennen worden overgebracht; het beeld verschuift dus niet als er bijv. iemand op de lessenaar leunt! Het verschuiven van het praeparaat gaat vlug en zonder moeite, daar de in de dichting te overwinnen wrijvingskracht slechts ongeveer 10 newton (1 kg) bedraagt.

Wij hebben reeds vermeld dat de praeparaathouder is voorzien van een sluisinrichting. Het principe hiervan is in fig. 13 te zien. Bij het uitnemen van de praeparaathouder wordt een soort rubber zuigertje door een veer gedrukt in de opening



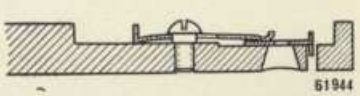



Fig. 12. De stangvormige praeparaathouder, met links daaronder (sterk vergroot) een der zilveren plaatjes die als dragers voor praeparaten fungeren. De tekening rechts geeft aan hoe een plaatje in de houder wordt geklemd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



door welke de praeparaathouder naar buiten wordt getrokken, zodat deze opening automatisch wordt afgesloten. Bij het weer inzetten van de houder wordt het zuigertje teruggeduwd, tegen de veer in. Slechts de geringe hoeveelheid lucht die zich bevindt tussen de praeparaatstang en de boring in de tafel (enkele mm³) wordt daarbij in de microscoopbuis binnengelaten.

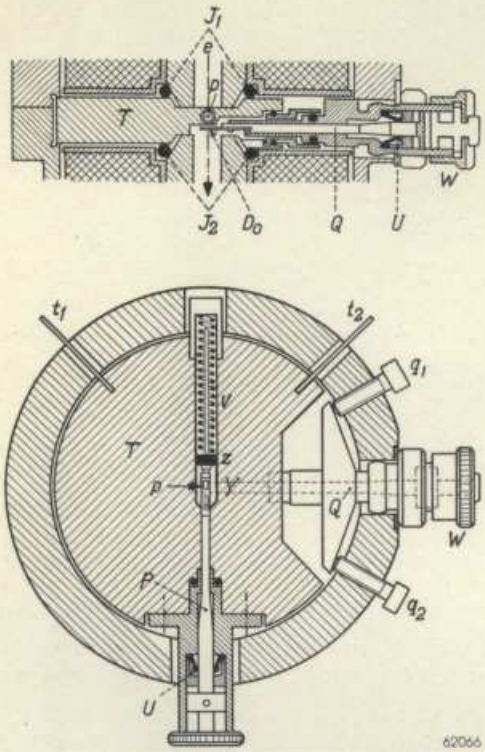



Fig. 13. De praeparaattafel ($T$), waarin de stangvormige praeparaathouder $P$ wordt gezet. $t_1$, $t_2$ pennen voor het verplaatsen van de tafel, waarbij de dichting van het vacuum wordt gehandhaafd door rubber ringen $J_1$, $J_2$. $Y$ praeparaatsluis, met rubber zuigertje $z$ en veer $v$. $Q$ houder van het objectiefdiafragma $D_o$, dat slechts enkele mm van het praeparaat verwijderd komt te staan. De axiale verschuiving van deze houder, voor het verwisselen van de beide objectiefdiafragma's, bewerkstelligt men door draaien van de kartelmoer $W$, waarbij twee aanslagen ieder met de juiste stand van één der diafragma's corresponderen. Om het kleine diafragma gemakkelijk met de vereiste nauwkeurigheid in de as van de microscoop te kunnen brengen, is de geleiding van de houderstang $Q$ iets zwenkbaar gemaakt; deze justering van de richting van $Q$ geschiedt met de stelschroeven $q_1$, $q_2$. Zij is slechts nodig als de houder eens geheel uitgetrokken is geweest, bijv. voor reiniging van het diafragma. $U$ zijn rubber dichtingen van het zg. oil-seal type.

Dank zij de stangvormige praeparaathouder is ook een uiterst eenvoudige methode mogelijk geworden voor het maken van stereomicrogrammen. De stang kan, zonder verstoring van het vacuum, over een kleine hoek om haar as worden gedraaid. Deze as ligt in het praeparaatvlak, het midden van het praeparaat blijft dus bij de draaiing op zijn plaats. Aldus kan men achtereenvolgens twee opnamen van het praeparaat maken die alleen daarin verschillen dat de electronenbundel het praeparaatvolume onder iets verschillende hoek doorsneed. Bekijkt men deze opnamen in een stereoscoop, dan ziet men een ruimtelijk beeld. Dank zij de grote scherptediepte van de electronenmicroscoop zijn corresponderende gedeelten in de beide opnamen even scherp, hoewel het desbetreffende praeparaatgedeelte een keer vóór en een keer achter het exacte voorwerpsvlak heeft gestaan.

*De camera en toebehoren*

Het is een opmerkelijk feit dat bij de electronenmicroscopie het fotografisch vastgelegde beeld in staat is meer te laten zien dan het visueel, op het fluorescentiescherm, waargenomene — dit in tegenstelling met andere, vergelijkbare instrumenten, zoals de telescoop en de lichtmicroscoop, waar gewoonlijk het omgekeerde het geval is. Het ligt daarom voor de hand dat men zich bij de electronenmicroscoop bij voorkeur van de fotografische waarnemingswijze zal bedienen. Men heeft in dat geval ook de belangrijke voordelen dat het bestuderen der beelden niet de bedrijfstijd van het instrument in beslag behoeft te nemen, en dat op de in microgrammen vastgelegde beelden steeds kan worden teruggegrepen.

Het fotografisch vastleggen van de beelden geschiedt bij onze microscoop op normale film van 35 mm breedte. De camera, die in *fig. 14* is afgebeeld, bevat in hoofdzaak de beide spoelen voor het op- en afwikkelen van de film en een sluiter in de vorm van een opklapbaar dekseltje. De film komt op zodanige afstand van de projectorlens te liggen dat het gefotografeerde beeld correspondeert met een vierkant van 14 × 14 cm op het scherm, d.i. het vierkant dat juist in de cirkel van 20 cm diameter past. De spoelen bieden ruimte aan een filmrol voor 40 opnamen.

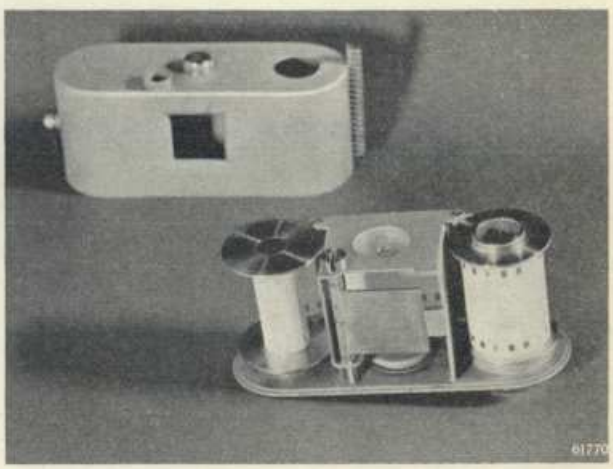


Fig. 14. De camera voor 35 mm-film, die voor het fotografisch vastleggen van het beeld dient.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Bij de visuele waarnemingen staat de camera opzij van de projectieruimte, maar in het vacuum; zie *fig. 15*. Voor het maken van een microgram wordt de camera door middel van een buiten op de microscoop aangebrachte draaiknop in de electronenbundel geschoven. Met een tweede knop opent men het sluiterklepje, zodat de electronen op de film vallen. Met een eenvoudige kleine meetinrichting, die in fig. 15 onderaan is te zien, bepaalt men globaal de vereiste belichtingstijd.

Het transporteren van de film gebeurt automatisch bij het bewegen van de camera: bij iedere complete heen- en weergang van de camera wordt de film een beeldlengte doorgedraaid, zodat dubbele belichtingen uitgesloten zijn. Het hiervoor toegepaste mechaniek is analoog aan dat van de bekende drilboren, waardoor een heen- en weergaande beweging in een éénzijdige draaibeweging wordt omgezet. In *fig. 16* is het mechaniek afgebeeld en nader toegelicht. Is de film vol, dan haalt men de camera, na lucht in de microscoop gelaten te hebben, er uit door een met twee schroeven bevestigd deksel los te maken.

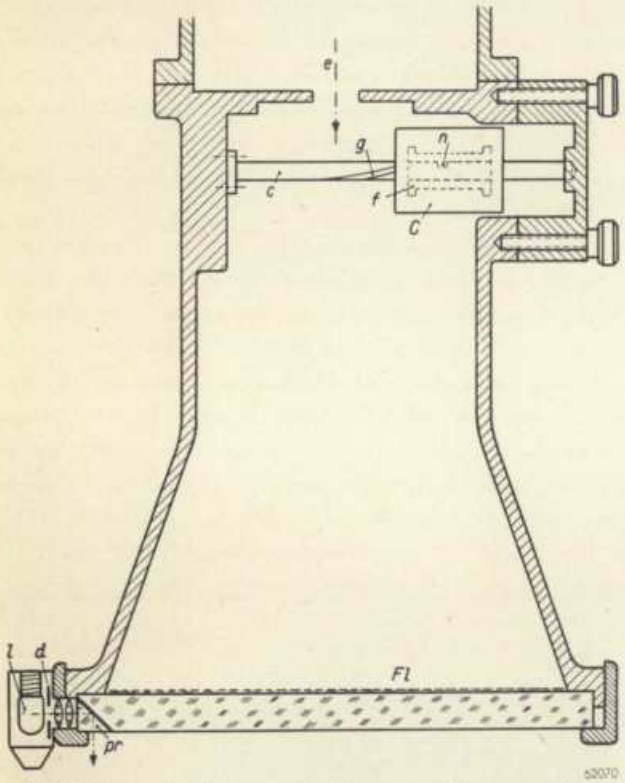



Fig. 15. Projectieruimte van de microscoop. De camera *C* staat hier in de ruststand. Voor het maken van een microgram wordt de camera, glijdende over de pen *c*, in de electronenbundel *e* geschoven. — Onderaan op de rand van de afsluitruit is een eenvoudig fotometertje aangebracht, om globaal de vereiste belichtingstijd voor elk beeld te bepalen. Een lampje *l* produceert via een lensje en een prisma *pr*, dat in een uitgeslepen hoek van de afsluitruit zit, een kleine lichtvlek, die de waarnemer naast het beeld op het fluorescentiescherm (*Fl*) ziet. Met een in vier stappen verstelbaar diafragma *d* regelt men de sterkte van de lichtvlek zodanig dat hij zo weinig mogelijk contrasteert met het schermbeeld. De af te lezen stand van het diafragma — de cijfers worden door het lampje zelf verlicht, zodat men in het donker aflezen kan — geeft bij geijkte filmgevoeligheid een maat voor de nodige belichtingstijd, en wel corresponderen de vier standen met belichtingstijden in de verhouding 1:3:10:30. Een nauwkeuriger bepaling is in de practijk in de allermeeste gevallen niet nodig. (*f*, *g*, *n* zie in fig. 16.)

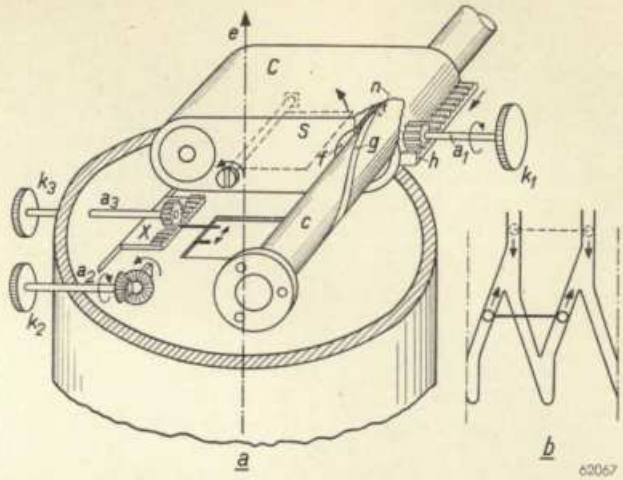



Fig. 16. Mechanisme voor de bediening van de camera en het automatisch filmtransport (de electronenbundel *e* is in deze figuur naar boven gericht).
*a*) Het heen- en terugbewegen van de camera *C* wordt bewerkstelligd met de draaiknop $k_1$, via het vacuumdicht doorgevoerde asje $a_1$ en de tandheugelaandrijving *h*. De draaiknop $k_2$, die met de andere hand wordt bediend, opent via het asje $a_2$ het sluiterklepje *s*. Bij het verschuiven van de camera glijdt deze over een vaste pen *c*, die door de holle bus steekt van de filmspoel *f* die de belichte film opwikkelt. Deze bus draagt een naar binnen gerichte nok *n*, welke glijdt in een spiraalgroef *g* die in de vaste pen is gefraisd. Bij het verschuiven van de camera krijgt derhalve de spoel een draaiende beweging, en wel zo dat de film juist een halve beeldlengte wordt verder getrokken als de camera van de buitenste stand geheel naar binnen wordt geschoven. Bij het terugschuiven volgt de nok een tegengestelde spiraalgroef (die naar het begin van de eerste terugleidt), zodat de spoel dan in dezelfde richting verder draait en de film nog eens een halve beeldlengte verder trekt. De nok kan nooit dezelfde groef terug volgen, daar een vrijloopkoppeling het daarmee corresponderende terugdraaien van de opwikkelspoel belet; men is dus gedwongen de camera steeds tot de aanslag naar de ene en naar de andere richting door te schuiven, zodat ook geen gedeeltelijk op elkaar vallen der opnamen mogelijk is. Een telwerkje aan de draaiknop $k_1$ geeft aan, hoeveel van de 40 opnamen op de filmrol reeds zijn gemaakt.

In werkelijkheid zijn er niet één maar twee nokken, die in twee groeven heen en in twee tegengestelde groeven terug lopen (zie figuur *b*, de afwikkeling van de pen). Dank zij deze verdubbeling correspondeert met het transport van een hele beeldlengte slechts een halve omwenteling van de filmspoel; deze spoel krijgt dus de dubbele diameter, hetgeen het voordeel heeft dat de variatie in doorgetrokken filmlengte van het eerste tot het veertigste beeld betrekkelijk klein is en hierdoor niet veel filmlengte behoeft te worden verspild. Bovendien geven de steilere groeven een grotere zijdelingse krachtcomponent op de nok, zodat het draaien van de filmspoel gemakkelijker in zijn werk gaat.

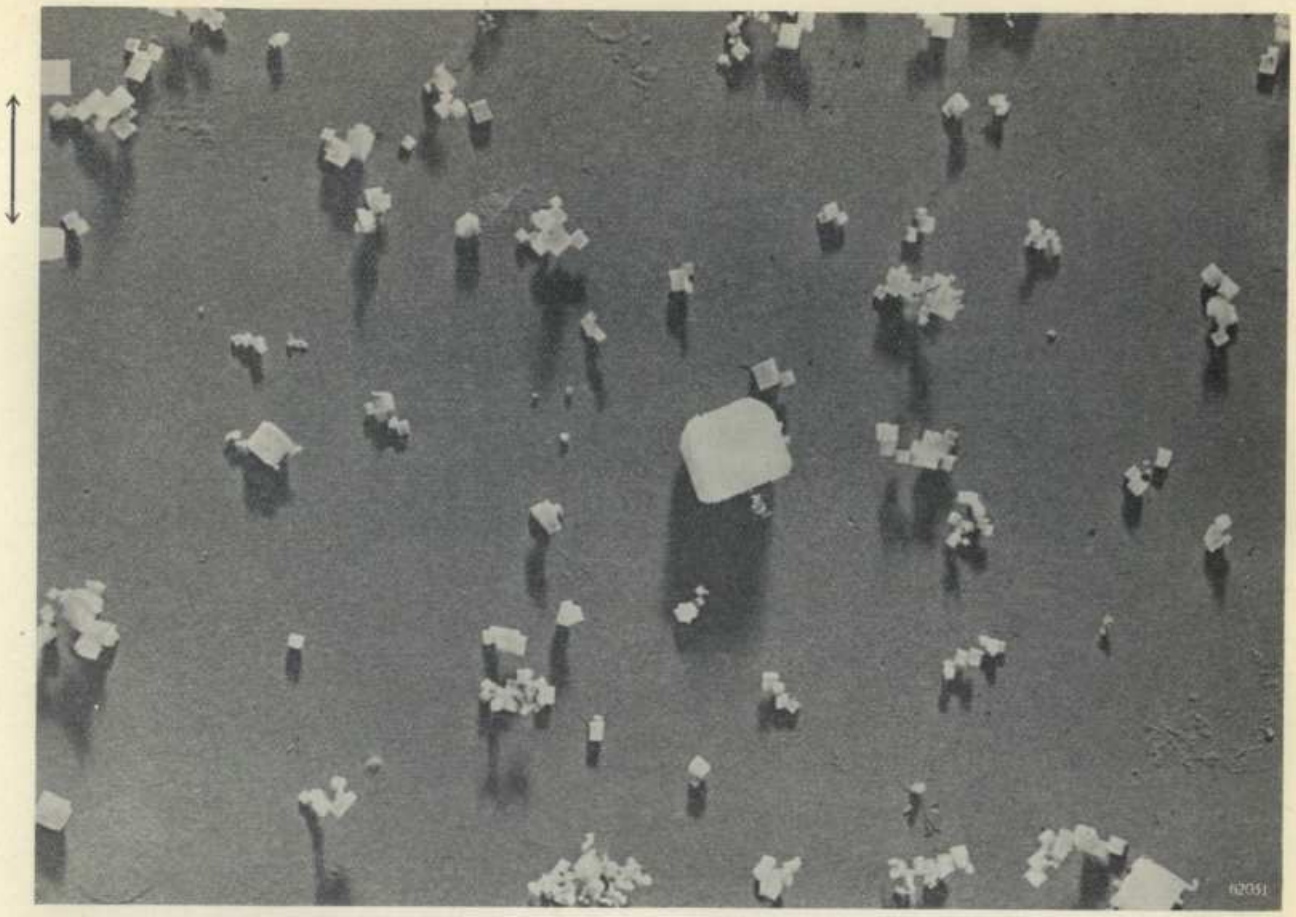
*X* is een inrichting voor het markeren van de schaal op de microgrammen.

Natuurlijk kan men, als men een bepaald microgram onmiddellijk wil ontwikkelen en bekijken, de camera uit de microscoop halen vóór de 40 opnamen van de film vol zijn. Terwijl men dan met het afwikkelen van de film enz. bezig is, kan het werken aan de microscoop met een andere, van te voren in gereedheid gebrachte, camera worden voortgezet.

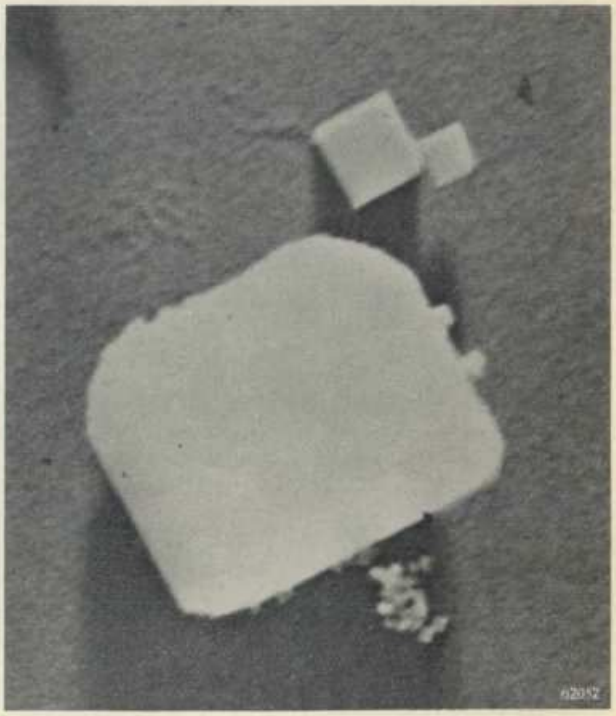
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023






*a*




*b*

Fig. 17. Micrograam van magnesiumoxyde, opgenomen met de Philips electronenmicroscoop bij een vergroting van 18 000×. De cubusvormige kristallen liggen op een film van „Formvar" en het geheel is „geschaduwd" met een straal van uraniumdamp. Bovenaan op de linkerrand van de foto ziet men de twee streepjes, welker afstand de lengte van 1 μ aangeeft. Foto *b* geeft een detail van *a*, met een vergroting van 60 000 ×.

Nader onderzoek van de originele micrograammen toont dat het scheidend vermogen hier beter is dan 50 ångström. Er zijn met fabriekmatig vervaardigde exemplaren van de hier beschreven microscoop reeds micrograammen verkregen waarop het scheidend vermogen, zoals met zekerheid kon worden geconstateerd, 25 ångström bedroeg.

Op elk te fotograferen beeld kan men op zeer eenvoudige wijze de schaal markeren. Vlak onder de projectorlens bevinden zich in de electronenbundel twee evenwijdige draadjes, welker afstand met een tandheugelaandrijving kan worden veranderd (zie $X$ in fig. 16, met knop $k_3$ en asje $a_3$). De draadjes geven twee evenwijdige schaduwstreepjes op een cm-schaal, aangebracht nabij de rand van het fluorescentiescherm. Men regelt nu de afstand der draadjes zo, dat de op de cm-schaal afgelezen afstand der streepjes correspondeert met 1 μ lengte in het praeparaat. De nodige afstand der streepjes volgt direct uit de vergrotingsfactor, welke men afleest aan een milliampèremeter die de bekrachtigingsstroom van de tussenlens resp. de diffractielens meet. De aldus afgetekende 1 μ-lengte klopt natuurlijk op elke plaats waar men de electronenbundel opvangt, dus ook op de film. In *fig. 17* is een micrograam gereproduceerd dat met onze electronenmicroscoop is gemaakt en waarop de 1 μ-markering is te zien.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Voor het verkrijgen van goede foto's moeten hoge eisen worden gesteld aan de electrische en mechanische stabiliteit van de microscoop. Over de electrische stabiliteit komen we zo dadelijk te spreken; wat de mechanische stabiliteit betreft, verdient hier nog eens in het licht te worden gesteld het belang van de starre constructie van de microscooptubus, waarin generlei flexibele verbindingen tussen de onderdelen voörkomen. Zelfs met alle voorzorgen (enige zullen we nog noemen) is het niet geheel te vermijden dat kleine trillingen op de microscoopbuis worden overgebracht. Om de gevoeligheid van ons instrument hiervoor te toetsen, brachten we bij wijze van experiment een trillingsbron in de lessenaar aan, waarbij de praeparaathouder bleek te trillen met een amplitude van 2 $\mu$. Hoewel dit, bij een vergroting van bijv. 20 000×, op een vaststaande film een onscherpte had moeten geven van 4 cm, was het verkregen microgram volkomen scherp! Dank zij de starre constructie deden de overgebrachte trillingen alle delen van de microscooptubus inclusief de praeparaathouder als een geheel bewegen, waarbij de beeldkwaliteit intact blijft.

Tot besluit van dit hoofdstuk geven wij in *fig. 18* een foto waarop de microscoopbuis in haar geheel goed is te zien en waarop men enkele van de besproken onderdelen zonder moeite kan identificeren.

## De hoogspanningsvoeding

De electronen kunnen worden versneld met een spanning van 40, 60, 80 of 100 kV. De hoogste spanning — die voor een in de handel verkrijgbare electronenmicroscoop ongewoon hoog is — maakt het mogelijk ook de dikste in normale onderzoekingen voorkomende objecten, nl. bacteriën, te fotograferen. De laagste spanningen kunnen gewenst zijn voor het onderzoeken van extreem dunne en lichte praeparaten, die bij hogere spanning minder contrastrijke beelden geven. Ook kan de laagste spanning wel eens van nut zijn om opnamen te maken onder ongunstige vacuumcondities, dus als bijv. het praeparaat of de film nog gas afgeeft, dat bij hogere spanning het bedrijven van de buis onmogelijk zou maken.

In dit verband is het nuttig nog even een principiële kwestie aan te roeren, nl. die van de helderheid der op het fluorescentiescherm geprojecteerde, vergrote beelden. Bij microprojectie met een lichtmicroscoop krijgt men bij de grootste zinvolle vergroting, van ca 1000×, nog niet al te donkere beelden, indien men een lichtbron met een helderheid van bijv. 2000 candela/cm² (kaars/cm²) gebruikt. Voor een 100 keer sterkere vergroting echter zou men, om even heldere beelden te krijgen, moeten beschikken over een 10 000 keer helderder lichtbron, d.i. een lichtbron ongeveer 100 maal helderder dan de zon! Bij de electronenmicroscopie is de situatie in wezen analoog. Er is een enorm „heldere" bundel („helderheid" hier = energie per seconde, per eenheid van ruimtehoek en per eenheid van schijnbaar emitterend oppervlak) nodig om bij een vergroting van 100 000× een voldoend helder fluorescentiebeeld te krijgen. Dat men hier niet vastloopt, is te danken aan het feit dat men aan de geëmitteerde bundel, die het praeparaat moet verlichten, nog energie kan toevoeren, door het versnellen van de electronen.

De hoge spanning heeft dus nog een andere betekenis dan alleen het voldoende „hard" maken van de electronen om door het praeparaat te kunnen dringen.

De hoge gelijkspanning wordt geleverd door een cascadegenerator van een gebruikelijk type, bestaande uit een 50 kV-transformator en een combinatie van twee ventielen en twee condensatoren.

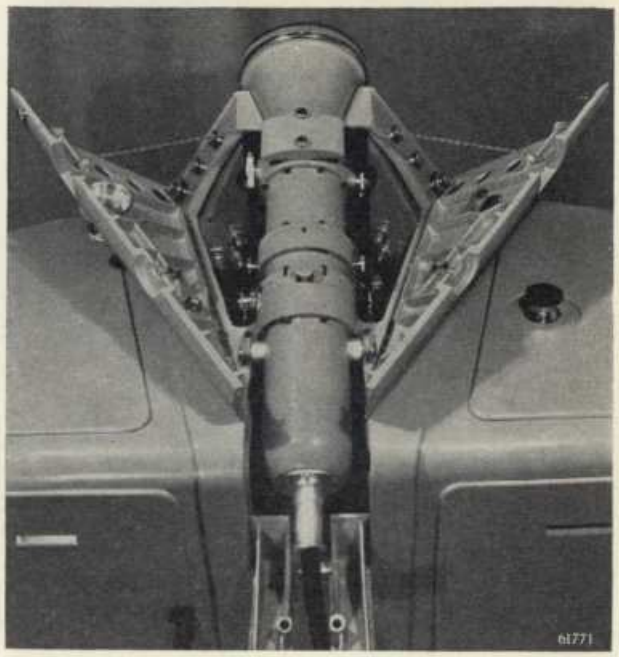


Fig. 18. Bovenaanzicht van de lessenaar, met geopende beschermingskappen van de microscoopbuis. Bovenaan de kegelvormige projectieruimte, aan de hals waarvan de twee bedieningsknoppen voor de camera staan en het afneembare deksel voor het verwijderen van de camera. Halverwege de buis, bovenop, de knop van de praeparaathouder, links daarvan, opzij van de buis, de knop van het objectiefdiafragma, en iets hoger, aan weerskanten van de buis, de knoppen van het selectiediafragma.

De spanning wordt door een filter afgevlakt. Zij wordt op een van de vier eerder genoemde waarden ingesteld door middel van een vóór de hoogspanningstransformator geschakelde regeltransformator. In *fig. 19* is een foto van de generator weergegeven. Hij wordt in een met olie gevulde bak gemonteerd.

De plaatsing van de generator in de lessenaar en de aansluiting op de microscoopbuis, door een rubber kabel met geaarde mantel, zijn goed te zien in fig. 2. De kabel is met een flinke boog achter uit de lessenaar gevoerd en axiaal op de kop van de microscoopbuis bevestigd, zodat hij voldoende speling biedt bij het openen van de kathoderuimte ten behoeve van het vernieuwen van de gloeidraad. De kabelmantel wordt luchtdicht aangesloten op het geaarde omhulsel aan de kop van de microscoopbuis — een overeenkomstige constructie

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



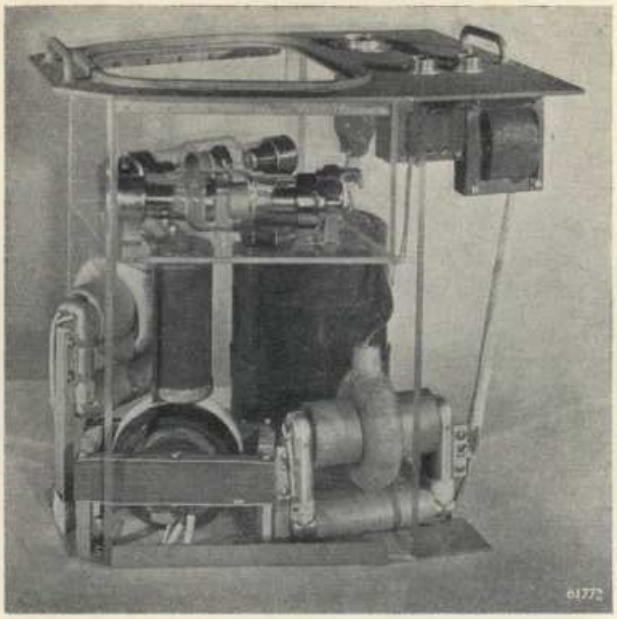


Fig. 19. De hoogspanningsgenerator, gereed voor plaatsing in een met olie gevulde bak. Links onderaan de hoogspanningstransformator voor 50 kV. Daar bovenop een der condensatoren en, nog hoger, de twee ventielen voor de cascadeschakeling (zie het schema fig. 20); de tweede condensator bevindt zich, tezamen met de weerstanden en condensatoren van het afvlakfilter, in de grote cylinder rechts achteraan. Rechts vooraan en geheel links, iets hoger geplaatst, de voor 100 kV geïsoleerde gloeistroomtransformatoren voor de kathode van een der ventielen en voor de gloeidraad van de microscoopbuis.

als men aantreft bij „Metalix"-röntgenbuizen. Daar geen isolerende oppervlakken aan de lucht zijn blootgesteld, kan het instrument ook onder ongunstige atmosferische condities en in het bijzonder bij verminderde luchtdruk (bijv. in laboratoria hoog boven de zeespiegel) worden gebruikt zonder dat er kans bestaat op een doorslag langs de isolatie.

De brandpuntsafstand van een magnetische electronenlens, bekrachtigd door een stroom $I$, voor electronen versneld door een spanning $V_0$, is evenredig met $V_0/I^2$ (althans zolang het ijzer van de poolstukken niet door de bekrachtiging verzadigd raakt; zie het in [1]) aangehaalde artikel, formule (4)). Ten einde volkomen scherpe microgrammen te krijgen, moet daarom worden geëist dat gedurende bijv. 30 seconden — d.i. zowat de langste tijd die men voor het scherp stellen en het daarop volgende belichten nodig kan hebben — de versnellingsspanning ten hoogste met 1/20000 varieert, de bekrachtigingsstromen zelfs ten hoogste met 1/40000.

Er bestaan verscheidene methoden om de hoogspanning in de vereiste mate te stabiliseren. De meest afdoende methode is wel deze, dat men de optredende variaties van de hoogspanning regelend laat terugwerken op de ingang van de hoogspanningsgenerator [3]). Daardoor bestrijdt men zowel variaties veroorzaakt aan de ingang (netspanningsschommelingen) als ook variaties veroorzaakt aan de uitgang. De laatste zijn te wijten bijv. aan een dalend emissievermogen van de gloeidraad, aan variaties van de gloeispanning, aan het vrijkomen van sporen gas in de buis, of, algemeen gezegd: aan een verandering van de belasting. In ons geval nu is, dank zij de eerder beschreven „tegenkoppeling" van de electronenbron, de belasting van de generator in hoge mate constant. Men kan daarom volstaan met het stabiliseren van de ingangsspanning van de generator.

Daartoe voeden wij de generator uit een kleine buisoscillator (afgegeven vermogen 20 W), die oscilleert met een frequentie van 100 Hz. De gelijkspanningen nodig voor het voeden van deze oscillator worden betrokken uit een gestabiliseerd plaatspanningsapparaat van bekende constructie [4]). *Fig. 20* geeft de schakeling van de gehele generator schematisch weer.

De pointe van de gebezigde stabilisatiemethode is, dat het weinig moeite kost een lage gelijkspanning zeer constant te houden, en dat aldus gemakkelijk een zeer constante uitgangswisselspanning van de oscillator wordt verzekerd. Pogingen om de wisselspan-

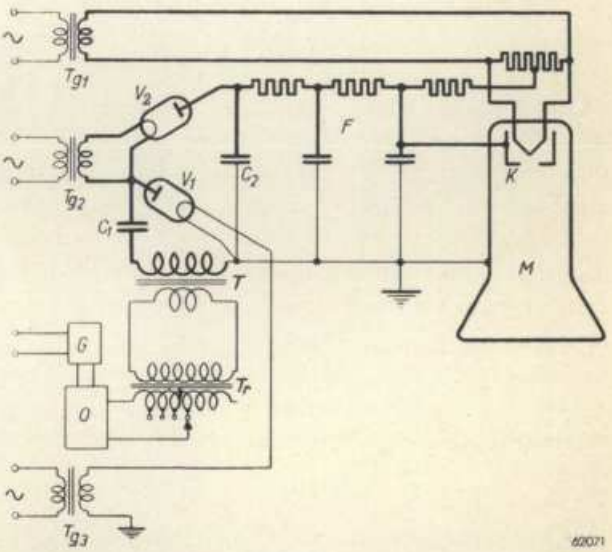



Fig. 20. Schakeling van de hoogspanningsgenerator. $T$ hoogspanningstransformator, $C_1$, $C_2$ condensatoren en $V_1$, $V_2$ ventielen van de cascadeschakeling, $T_r$ regeltransformator, $T_{g1}$, $T_{g2}$, $T_{g3}$ gloeistroomtransformatoren, $F$ afvlakfilter, $M$ microscoopbuis met kathode $K$ en geaarde anode. De generator wordt gevoed uit de buisoscillator $O$ (frequentie 100 Hz), die de nodige plaat- en gloeispanningen verkrijgt uit het gestabiliseerde voedingsapparaat $G$. De dik getekende gedeelten van de schakeling komen op hoogspanning te staan.

[3]) Zie bijv.: A. C. van Dorsten, Het stabiliseren van de versnellingsspanning voor een electronenmicroscoop, Philips techn. T. **10**, 137-143, 1948.

[4]) H. J. Lindenhovius en H. Rinia, Een gelijkstroomvoedingsapparaat met gestabiliseerde spanning, Philips techn. T. **6**, 54-61, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



ning van het net rechtstreeks te stabiliseren en als ingangsspanning voor de hoogspanningsgenerator te gebruiken, bijv. door middel van de bekende regelaars met transformatoren met verzadigde kern, waren in ons geval tot mislukking gedoemd, aangezien deze regelaars te traag zijn om piekvormige storingen weg te regelen en ook te gevoelig zijn voor de, tegenwoordig veelvuldig optredende, schommelingen van de netfrequentie.

De keuze van de lage frequentie van 100 Hz voor de buisoscillator maakte het mogelijk een hoogspanningstransformator te nemen van een normaal, voor röntgeninstallaties veel gebruikt type. Bij hogere frequenties zou een transformator van speciale constructie, met slechts geringe capaciteit tussen de windingen, nodig zijn geweest.

Overal waar de versnelde electronen botsen, worden röntgenstralen opgewekt. Dit is voornamelijk het geval op het condensordiafragma, dat globaal de helft van de geëmitteerde electronen opvangt. Het metalen omhulsel van de microscoopbuis, resp. de ijzeren mantels van de lensspoelen, maken het overbodig speciale maatregelen ter bescherming van de gebruiker tegen de röntgenstralen van deze bron te nemen. Meer aandacht moest worden besteed aan de röntgenstralen die worden opgewekt op het fluorescentiescherm. Weliswaar bereiken deze alleen bij de sterkste concentratie van de electronenbundel op het praeparaat en bij de zwakste vergrotingen een noemenswaardige intensiteit, doch de stralenbron bevindt zich hier dicht bij het gezicht van de gebruiker; om deze straling onschadelijk te maken, is de dikke afsluitruit van de microscoopbuis van loodglas vervaardigd, en is de binnenzijde van het omhulsel der projectieruimte met een laagje lood bekleed. De röntgendosis die een gebruiker bij een 8-urige werkdag kan krijgen, bedraagt zodoende niet meer dan 1/100 à 1/10 van de in verschillende landen vastgestelde tolerantiedosis.

### De bekrachtiging van de electronenlenzen

De wikkelingen van de magnetische lenzen moeten, zoals reeds vermeld, worden bekrachtigd met een stroom die gedurende 30 seconden niet meer mag variëren dan 1 : 40 000. Voor deze bekrachtiging kan niet rechtstreeks een gestabiliseerd voedingsapparaat als het bovengenoemde (zie noot [4])) worden gebruikt. Immers, dit levert een constante spanning; de weerstand van de lenswikkelingen verandert relatief sterk met de temperatuur (die, ondanks de waterkoeling, geenszins als constant genoeg mag worden beschouwd). Met een variant van de schakeling, beschreven in het aangehaalde artikel [4]), kan men echter ook een voedingsapparaat construeren dat een constante stroom levert. De door ons gebezigde schakeling is, sterk vereenvoudigd, in *fig. 21* weergegeven, en in het bijschrift toegelicht. Globaal kan men de werking er van zo beschrijven dat de schakeling de tendentie heeft, de spanning tussen de punten $a$ en $b$ constant te houden, en aangezien voor de weerstand $R_0$ tussen $a$ en $b$ een nauwkeurig afgeregelde weerstand met uiterst kleine temperatuurcoëfficient wordt genomen, blijft de stroom door deze weerstand, die dezelfde is als de bekrachtigingsstroom van de lenswikkeling $L$, eveneens zeer goed constant.

Men kan de stroom op de gewenste waarde instellen door de weerstand $R_0$ te veranderen. Dit brengt mede dat voor elke lens die onafhankelijk van de andere in sterkte moet worden gevarieerd, een afzonderlijk voedingsapparaat volgens fig. 21 nodig is. Dit is het geval met de diffractielens resp. tussenlens, voor het variëren van de vergroting, en met de condensorlens, voor het regelen van de „verlichting". De brandpuntsafstanden van objectieflens en projectorlens daarentegen, waarvan de eerste alleen voor het scherp stellen in zeer geringe mate variabel moet zijn, kunnen aan elkaar worden gekoppeld. Er zijn dus in totaal drie voedingsapparaten. Deze zijn, tezamen met het

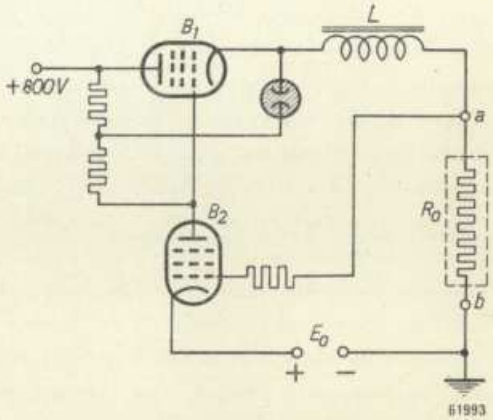



Fig. 21. Vereenvoudigd schakelschema van het voedingsapparaat dat een constante stroom levert voor de bekrachtiging van een electronenlens. Neemt de stroom door de lenswikkeling $L$ toe, dan stijgt de spanning op de constante weerstand $R_0$, het stuurrooster van de penthode $B_2$ (een EF 6) wordt minder negatief, de stroom door $B_2$ neemt toe, de anodepotentiaal daarvan daalt, dus het stuurrooster van de penthode $B_1$ (een EL 51) wordt sterker negatief, en de tendentie tot stijgen van de stroom door $B_1$ (= stroom door $L$) wordt tegengewerkt. — De regeling is gevoeliger, dwz. de resulterende stroomvariaties zijn kleiner, naarmate de versterkingsfactor van de beide buizen groter is en naarmate voor $R_0$ een grotere weerstand wordt genomen. Om bij een grote waarde van $R_0$ de vereiste roostervoorspanning van $B_2$ te verkrijgen, compenseert men de spanningsval op $R_0$ door een voldoend grote tegengestelde spanning $E_0$ ($\approx$ 75 volt). Deze spanning, die als het ware als vergelijkingsspanning dient, moet natuurlijk zelf zeer constant zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 22. Uitgetrokken chassis met de drie voedingsapparaten, voor de condensorlens (max. 100 mA), de diffractie- resp. tussenlens (max. 100 mA), en de objectief- en projectorlens (max. 400 mA). Het laatstgenoemde voedingsapparaat bevat, wegens de grote vereiste stroomsterkte, op de plaats van de penthode $B_1$ drie buizen EL 51 parallel. Achteraan het gestabiliseerde plaatspanningsapparaat dat de constante vergelijkingsspanning $E_0$ levert.

gemeenschappelijke kleine gestabiliseerde plaatspanningsapparaat dat de vereiste constante vergelijkingsspanning ($E_0$ in fig. 21) levert, in *fig. 22* te zien.

Het aan elkaar koppelen van objectieflens en projectorlens is gedaan door de wikkelingen dezer lenzen in serie te schakelen, en wel met tegengestelde omlooprichting van de stroom. Dit heeft het voordeel dat de draaiingen van het beeld, welke de beide lenzen veroorzaken (vgl. het bijschrift van fig. 3), elkaar vrijwel opheffen. Bij het scherp stellen ondervindt men derhalve geen last van een draaien van het beeld.

Ook bij het variëren van de vergroting, door variatie van de bekrachtigingsstroom van de tussenlens resp. diffractielens, draait het beeld niet noemenswaard, dank zij het feit dat deze lenzen slechts met relatief geringe vergroting werken en derhalve op zichzelf al vrijwel geen beelddraaiing veroorzaken.

Bij variëren van de versnellingsspanning $V_0$ der electronen moeten de bekrachtigingsstromen van alle lenzen, om dezelfde brandpuntsafstanden te krijgen, eveneens worden gewijzigd (en wel omgekeerd evenredig met $\sqrt{V_0}$, zie hierboven). In elk der drie voedingsapparaten zijn daarom, voor de vier trappen van de hoogspanning, vier verschillende weerstanden $R_0$ aanwezig, die bij het kiezen van de hoogspanning (met de grote schakelknop vooraan op de lessenaar, goed te zien in fig. 2) automatisch mee worden omgeschakeld. Bij het wisselen van de spanning behoeven dus de lenzen niet of bijna niet te worden bijgeregeld.

De baan der electronen mag niet beïnvloed worden door vreemde magnetische (of electrische) velden. Bij sommige microscopen heeft men hiertoe een speciale afscherming moeten aanbrengen; in onze microscoop kon daarvan worden afgezien, daar de lensspoelen met hun ijzeren mantels, die onmiddellijk bij elkaar aansluiten, reeds een voortreffelijke afscherming vormen.

### Het vacuumsysteem

Om de microscoopbuis met 100 kV te kunnen bedrijven, moet in de buis een druk heersen lager dan $10^{-4}$ mm Hg. Aangezien bij het werken met de microscoop telkens het vacuum moet worden verstoord en daarna hersteld, is een snel werkend en gemakkelijk te bedienen pompsysteem van essentieel belang. Het uitgevoerde systeem is in *fig. 23* schematisch weergegeven. Het bevat twee hoogvacuumpompen in serie, nl. een oliediffusiepomp en een kleine, als voorpomp hiervoor dienende, kwikdampstraalpomp, die een pompsnelheid van ca 10 l/sec bij $10^{-4}$ mm Hg ontwikkelen, verder een

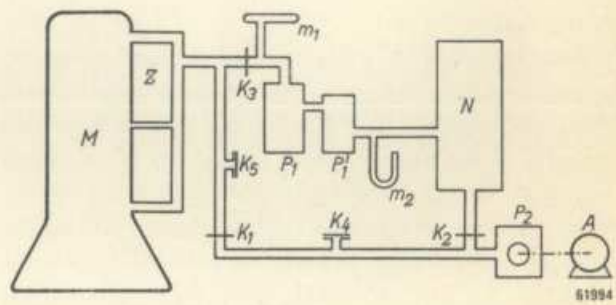



Fig. 23. Schema van het vacuumsysteem. $M$ microscoopbuis, $Z$ pompleiding, $P_1$, $P_1'$ hoogvacuumpompen, $P_2$ voorvacuumpomp, aangedreven door motor $A$; de hoogvacuumpompen zijn voorzien van een waterkoeling, die in serie is geschakeld met die van de electronenlenzen. $N$ voorvacuumketel, $m_2$ manometer voor contrôle van het voorvacuum, $m_1$ Penningmanometer voor contrôle van het hoogvacuum; het als indicator voor deze manometer dienende neon-glimlichtbuisje is door een spleet in het frontpaneel van de microscooplessenaar zichtbaar (fig. 1). $K_1$-$K_5$ kleppen.

voorvacuumpomp (roterende oliepomp) en een voorvacuumketel. De pompleiding is op de microscoopbuis aangesloten op drie plaatsen: twee wijde aansluitingen bevinden zich ter hoogte van de kathoderuimte en de projectieruimte, een nauwere ter hoogte van het selectiediafragma (zie fig. 2). De af te zuigen lucht behoeft dus niet telkens door de gehele microscooptubus met zijn nauwe openingen te stromen. De aansluitingen zijn uitgevoerd met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



een dichting door rubber ringen, zodanig dat geen trillingen van de hoogvacuumpompen op de microscoopbuis worden overgebracht.

Het evacueren van de microscoop gaat in vier stappen:

1) de microscoopbuis wordt op voorvacuum gebracht, terwijl de hoogvacuumpompen reeds van te voren zijn verwarmd;
2) de voorvacuumketel, met de permanent hiermee verbonden hoogvacuumpompen, wordt op voorvacuum gebracht;
3) de microscoopbuis wordt aangesloten op de hoogvacuumpompen;
4) de verbinding tussen voorvacuumketel en voorvacuumpomp wordt verbroken en de voorvacuumpomp stopgezet (tevens wordt lucht boven de olie in deze pomp toegelaten, om opstijging van de olie in de pompleiding te voorkomen).

De gehele cyclus neemt onder normale omstandigheden, beginnende met een microscoop die met lucht onder atmosferische druk is gevuld, ongeveer 2 minuten in beslag [5]). Heeft men toestand (4) bereikt, dan kan men, dank zij de aanwezigheid van de voorvacuumketel en de praeparaatsluis, enige uren achtereen met de microscoop werken en talrijke praeparaten onderzoeken voordat de voorvacuumpomp weer enkele minuten moet worden ingeschakeld.

De verschillende nodige verbindingen tussen de pompleidingen worden bewerkstelligd door kleppen, die gemakkelijker te bedienen zijn dan de klassieke kranen. De leidingen zijn zo gelegd dat alle kleppen bij elkaar konden worden gebracht in één kleppenkast. Alle volgens het bovenstaande schema te maken verbindingen worden nu tot stand gebracht door draaien aan één enkele knop, die een nokkenas in de kleppenkast aandrijft, met voor elke klep een nok van bepaalde omtrek en in bepaalde stand.

De draaiknop heeft behalve de vier standen die corresponderen met de boven genoemde vier stappen, nog een vijfde stand, de ruststand (0). In deze stand is de microscoop afgesloten van alle pompen en kan men, door indrukken van een drukknop, atmosferische lucht in de microscoop binnenlaten. Een filter in de pompleiding houdt hierbij vocht en stof tegen.

[5]) Geregeld moet deze cyclus worden doorlopen na het inzetten van een nieuwe filmrol. Ook dan kan de microscoop na 2 minuten geëvacueerd zijn, echter alleen als de film droog bewaard werd. Heeft men deze eenvoudige voorzorgsmaatregel achterwege gelaten, dan kan, doordat de gelatinelaag vocht heeft opgenomen, dat slechts langzaam vrij komt, het evacueren uren duren!

**Bediening van het instrument; beveiligingen**

In de hierboven gegeven beschrijving van de Philips electronenmicroscoop is telkens de nadruk gevallen op maatregelen waardoor getracht is het werken met dit instrument gemakkelijk te maken. We herinneren aan: het richten van de electronenbundel, het scherp stellen van het beeld, het controleren van de diafragma's, het inbrengen van het praeparaat, het maken van een opname, het verwisselen van de gloeidraad, de eenknopsbediening van het vacuumsysteem.

Het principe van eenknopsbediening en een daarmee verbonden automatisering zien wij bij de microscoop nog meer toegepast. We noemden reeds de spanningskiezer, die automatisch de lensstromen mee omschakelt. Een ander voorbeeld is de regeling van de vergroting: één draaiknop bestrijkt het gehele gebied der vergrotingen, van 1000× tot 60 000×. Het overschakelen van de diffractielens naar de tussenlens, dat nodig is om van vergrotingen kleiner dan 4000× tot sterkere vergrotingen over te gaan, geschiedt automatisch met dezelfde knop. Nog een voorbeeld: de scherpstel-inrichting. Het in werking stellen van de afbuiging geschiedt eenvoudig door drukken op een knop, die men zolang vasthoudt als men bezig is aan de potentiometer van de bekrachtiging der objectieflens te draaien. Ten slotte wederom het vacuumsysteem: op de as van de draaiknop hiervan is tevens een schakeltrommel aangebracht, die zorgt dat in de standen 1, 2 en 3 de motor van de voorvacuumpomp is ingeschakeld, in de standen 4 en 0 uitgeschakeld.

Tal van voorzieningen beveiligen het instrument tegen schade door storingen of door eventuele verkeerde manipulaties. De zojuist genoemde schakeltrommel, gekoppeld aan de draaiknop van het vacuumsysteem, heeft een extra contact, dat een relais bedient zodanig, dat alleen in stand 4 van de knop de hoogspanning op de microscoopbuis kan worden gezet. Men kan dus niet bij vergissing de hoogspanning inschakelen als men nog niet de buis heeft geëvacueerd, wat een doorslag in de buis zou veroorzaken. Mocht men echter niet voldoende op de manometer hebben gelet en te vroeg tot stand 4 zijn overgegaan, of mocht door de een of andere fout het vacuum in de buis slechter worden, dan kan er nòg niets gebeuren, want een maximaalschakelaar in de aardleiding van het hoogspanningscircuit schakelt de hoogspanning af zodra de emissiestroom in de buis oploopt tot 3 mA — een waarde die correspondeert met het optreden van een glimontlading die de microscoopbuis nog generlei schade berokkent, evenmin als aan de generator. Verder heeft de draaiknop van het vacuumsysteem

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



een vergrendeling, die het volledig doordraaien slechts toelaat in één richting. Immers, een cyclus van het lucht binnenlaten en weer evacueren vereist het doorlopen van de standen 0 (ruststand)-1-2-3-4-0, altijd in deze volgorde. Zou men bij vergissing van stand 0, nadat lucht in de microscoopbuis toegelaten is, naar de verkeerde kant kunnen draaien, dus direct naar stand 4, waarin de buis verbonden wordt met de hoogvacuumpompen, dan zouden deze laatste door de plotseling te verwerken grote hoeveelheid lucht voor enige uren uit hun goede conditie kunnen worden gebracht. (Om dezelfde reden is de drukknop waarmee men lucht binnenlaat, vergrendeld, zodanig dat hij alleen in stand 0 kan worden ingedrukt.)

Vervolgens noemen we nog een veiligheidsschakelaar in de afvoerleiding van de waterkoeling: is er een stagnatie in de doorstroming, dan wordt automatisch de bekrachtiging van de electronenlenzen uitgeschakeld, en ook de verwarming van de hoogvacuumpompen, zodat er geen kwik- en oliedampen terecht kunnen komen in de microscoopbuis. Eveneens valt de verwarming der hoogvacuumpompen automatisch uit — en wordt het inschakelen van de hoogspanning onmogelijk —, als door een of andere oorzaak het voorvacuum in de ketel, gemeten door manometer $m_2$ in fig. 23, niet voldoende is. Deze beveiliging werkt met een relais, dat ingeschakeld wordt zodra de kwikkolom van de manometer een op bepaalde hoogte aangebracht contact bereikt.

Door middel van signaallampjes op het bedieningspaneeltje is de situatie, wat betreft de hoogspanning, de waterkoeling en het voorvacuum, met een oogopslag te overzien; op instrumenten waarvan enkele reeds werden vermeld, leest men de druk in de buis, de ingestelde vergroting, de emissiestroom, de gloeistroom, en de nodige belichtingstijd af, en controleert men de werking van de stabilisatie van de hoogspanning.

De bovenstaande beschrijving heeft wellicht wat veel van het geduld van de lezer gevergd. Wellicht ook is de indruk die onze inleiding moest geven, nl. dat een electronenmicroscoop niet bepaald een eenvoudig instrument is, thans nog versterkt. Het is echter goed zich te realiseren dat de ingewikkeldheid van de behandelde microscoop voor een groot deel niet op rekening is te schrijven van het principe van het instrument en zeker niet gepaard gaat met evenredige zwarigheden voor de gebruiker. Zij is, integendeel, juist een uitvloeisel van het streven de gebruiker zoveel mogelijk van de plicht tot opletten en handelen te ontheffen. Zoals op zovele plaatsen in de moderne techniek, is hier een deel van de menselijke taak overgeheveld naar de machine, opdat de mens zich in grotere mate kan concentreren op de mogelijkheden die de machine hem biedt.

---

**Samenvatting.** Bij de Philips electronenmicroscoop is de eigenlijke microscoopbuis in schuine stand gemonteerd op een lessenaar. Het beeld wordt waargenomen op een fluorescentiescherm van 20 cm diameter. In de lessenaar zijn de hoogspanningsgenerator, het pompaggregaat en de voedingsapparatuur voor de electronenlenzen ondergebracht. Het electronenoptische systeem, dat samengesteld is volgens grondslagen ontwikkeld door Le Poole, bestaat uit vijf magnetische lenzen. Behalve de gebruikelijke condensor-, objectief- en projectorlens zijn er een tussenlens en een diffractielens. Hierdoor kan de vergroting, bij geheel gevuld scherm, continu worden geregeld van 1000× tot 60 000×, en er kan ogenblikkelijk van het beeld van een praeparaat worden overgegaan tot het electronen-diffractiediagram er van.

De microscooptubus, met alle lenzen, vormt een star, nauwkeurig gejusteerd geheel. De electronenbundel wordt hierin gecentreerd met behulp van een stel afbuigspoeltjes. De objectieflens is zo geconstrueerd dat het voorwerpsvlak in de ruimte tussen de poolstukken (dus niet in de boring) komt te liggen. Het praeparaat kan derhalve, evenals het objectiefdiafragma, met een eenvoudige stangvormige houder van opzij op zijn plaats worden gebracht. Dank zij een sluisinrichting komt er bij het verwisselen van het praeparaat slechts enkele mm³ atmosferische lucht in de microscoop en duurt het herstellen van het vacuum niet meer dan 20 seconden. Het objectiefdiafragma en andere diafragma's kunnen gemakkelijk worden gecontroleerd op centrering en eventuele verontreiniging, en zo nodig worden bijgeregeld resp. schoongemaakt. Ook het verwisselen van de vooraf gecentreerde gloeidraad in de electronenbron gaat zonder moeite.

De beelden worden gefotografeerd op 35 mm-rolfilm. De verschuifbare camera, met een filmspoel voor 40 opnamen, staat in het vacuum. Het brengen van de camera in de electronenbundel en het openen van de sluiter geschiedt van buiten af, waarbij de film automatisch wordt verder gedraaid. Het scherp stellen van het beeld wordt vergemakkelijkt door de electronenbundel daarbij uit wisselende richtingen op het praeparaat te doen vallen.

De lenzen zijn met water gekoeld en worden gevoed uit drie voedingsapparaten, die een gestabiliseerde stroom van maximaal 100 resp. 400 mA leveren. De versnellingsspanning kan in vier stappen van 40 tot 100 kV worden gevarieerd. Daarbij worden automatisch de bekrachtigingsstromen van de lenzen zo gewijzigd dat het beeld scherp blijft. De hoogspanningsgenerator wordt zeer constant belast, doordat de electronenbron is voorzien van een stuurrooster met een automatische negatieve roosterspanning („tegenkoppeling"). Daardoor kon de nodige stabilisatie van de hoogspanning worden verwezenlijkt door alleen de ingangswisselspanning zeer constant te houden, hetgeen wordt bereikt door voeding uit een buisoscillator.

Voorvacuum- en hoogvacuumpompen worden in de juiste volgorde aangesloten door één bedieningsknop. Allerlei vergrendelingen en veiligheidsschakelaars beschermen het instrument tegen schade door storingen of verkeerde manipulaties. Verschillende hulpmiddelen dragen er toe bij, het werken met het instrument verder te vergemakkelijken, zoals een inrichting voor het gelijkmatig afzoeken van het praeparaat en voor het terugvinden van elk praeparaatgedeelte, een belichtingsmeter, een markeer-inrichting waarmee op elke foto de schaal kan worden aangegeven, enz.

---

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# EEN EXPERIMENTELE „STROBOSCOPISCHE" OSCILLOGRAAF VOOR FREQUENTIES TOT CIRCA 50 MHz

## I. GRONDSLAGEN

door J. M. L. JANSSEN.

621.317.755:621.3.029.5/.6

*De hoogste frequentie waarvoor men een gevoelige, op de klassieke wijze ingerichte kathodestraaloscillograaf kan construeren, is door verschillende omstandigheden beperkt tot omstreeks 10 MHz. Een kunstgreep echter maakt het mogelijk tot aanzienlijk hogere frequenties te komen. Deze kunstgreep bestaat hierin dat men gebruik maakt van een electrisch analogon der stroboscopische belichting, de algemeen bekende methode voor het bestuderen van periodieke bewegingen die zo snel geschieden dat het oog ze niet kan volgen. In de plaats van de stroboscopische lichtflitsen treden bij de hier besproken oscillograaf electrische impulsen, die de af te beelden spanningskromme als het ware aftasten en haar omzetten in een verschijnsel van laag periodental, dat dan op de normale wijze op een oscillograafbuis zichtbaar kan worden gemaakt.*

**Hoogste frequentie bij oscillografen van het gebruikelijke type**

Kathodestraaloscillografen van het conventionele type bestaan uit een kathodestraalbuis met electrostatische afbuiging, een versterker voor de oscillografisch weer te geven spanning (verticale afbuiging), een inrichting die een zaagtandvormige tijdasspanning levert (horizontale afbuiging), en nog enige andere onderdelen die hier niet ter zake doen. Elk der drie met name genoemde onderdelen stelt een grens aan de hoogste frequentie die men op het oscillogram nog goed kan waarnemen.

In de kathodestraalbuis treedt bij het opvoeren van de frequentie een looptijdeffect op, indien de periode van de afbuigspanning vergelijkbaar wordt met de tijd die de electronen nodig hebben om de ruimte tussen de afbuigplaten te doorlopen. Bij een versnellingsspanning van bijv. 1000 V wordt dit effect merkbaar bij frequenties in de orde van 100 MHz.

Een veel lagere grens treft men aan bij de versterker. Ten einde de versterking ook bij hoge frequenties onafhankelijk te houden van de frequentie, dient men genoegen te nemen met een geringe versterking per trap, zodat voor een grote gevoeligheid een groot aantal trappen nodig is [1]). Bovendien geldt voor de versterker van een oscillograaf de veel zwaardere eis, dat de componenten van een niet-sinusvormige spanning niet alleen in grootte, maar ook in faze getrouw moeten worden weergegeven. Daarbij komt nog dat de versterker in staat moet zijn een aanzienlijke wattloze stroom te leveren. De anodecapaciteit van de eindbuis en de daaraan parallelgeschakelde capaciteit van de afbuigplaten hebben namelijk bij een frequentie van bijv. 10 MHz tezamen een impedantie van slechts omstreeks 1000 ohm, zodat bij een spanning van bijv. 100 V tussen de platen de capacitieve stroom ongeveer 100 mA bedraagt. Men kan de frequentie 10 MHz dan ook beschouwen als ongeveer de bovenste grens waarvoor men nog een oscillograafversterker kan construeren die aan redelijke eisen voldoet.

Met de frequentie van de af te beelden spanning dient natuurlijk tevens de frequentie van de tijdbasis te worden opgevoerd. De hoogste frequentie waarmee men een voldoend grote zaagtandspanning met redelijke linearitëit en met korte terugslagtijd kan opwekken, bedraagt omstreeks 1 MHz. Is de frequentie van de af te beelden spanning (de spanning op het platenpaar voor de verticale afbuiging) bijv. 10 MHz, dan omvat het oscillogram dus nooit minder dan ongeveer tien perioden, een aantal dat men voor verscheidene doeleinden kleiner zou wensen.

In de tot dusverre uitgebrachte, normale Philips-oscillografen is met minder hoge grensfrequenties dan de genoemde genoegen genomen, om deze toestellen voor een groot toepassingsgebied niet nodeloos zwaar en kostbaar te maken. Zo bedraagt de maximale frequentie voor de verticale afbuiging bij type GM 3152 [2]) 1 MHz, bij type GM 3159 [3]) 0,5 tot 1 MHz (al naar gelang van de gevoeligheid), terwijl bij beide de hoogste tijdbasisfrequentie 150 kHz is. Bij andere typen liggen, om bijzondere redenen, deze grenzen nog lager.

[1]) Zie bijv.: H. J. Lindenhovius, G. Arbelet en J. C. van der Breggen, Een millivoltmeter voor het frequentiegebied van 1000 tot $30 \cdot 10^6$ per/sec, Philips techn. T. **11**, 210-218, 1949 (No. 7).

[2]) Philips techn. T. **4**, 210-216, 1939.

[3]) Philips techn. T. **9**, 202-210, 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Uiteraard bestaat er ook behoefte aan een oscillograaf voor frequenties hoger dan 1 MHz. In plaats van er een te ontwikkelen volgens de traditionele gedachtengang, die weinig vooruitzichten biedt tot hogere frequenties te komen dan 10 MHz, hebben wij er de voorkeur aan gegeven een geheel andere, meer belovende weg in te slaan. Wegens de analogie met de stroboscopische belichting noemen wij de hieruit voortgekomen oscillograaf de „stroboscopische" oscillograaf.

In dit eerste artikel worden de grondslagen van de stroboscopische methode uiteengezet; een volgend artikel zal gewijd zijn aan de electrische uitvoering van diverse onderdelen.

### Beginsel van de stroboscopische oscillograaf

Voeren wij aan de anode van bijv. een penthode (*fig. 1*) positieve spanningsimpulsen van constante amplitude toe, terwijl aan het stuurrooster alleen een negatieve gelijkspanning ligt (van zodanige grootte dat de buis niet is afgeknepen), dan bestaat de anodestroom uit impulsen, waarvan de grootte afhangt van de stuurroosterspanning. Wordt aan het stuurrooster bovendien een kleine wisselspanning $v_o$ toegevoerd, en is de frequentie $f_o$ van deze spanning gelijk aan de herhalingsfrequentie $f_i$ der periodieke impulsen op de anode (*fig. 2a*), dan hebben de anodestroomimpulsen alle eenzelfde grootte, die mede bepaald wordt door de faze van de impuls ten opzichte van de roosterwisselspanning. Hetzelfde is het geval als $f_o$ juist een geheel veelvoud is van $f_i$ (fig. 2*b*). Doch als $f_o$ iets van $f_i$ resp. $nf_i$ afwijkt (waarin $n$ een geheel getal is), heeft iedere impuls een andere faze ten opzichte van de wisselspanning dan zijn voorganger (fig. 2*c*). De impulsen „lopen" dan ten opzichte van de wisselspanning en tasten deze daarbij puntsgewijze af. De anodestroomimpulsen variëren dus in grootte en vormen als het ware een reeks momentopnamen van de grootte der wisselspanning. De laagste frequentie $f_z$ die in de anodestroom voorkomt, is gelijk aan de absolute waarde van het verschil tussen $f_o$ en $nf_i$. Bevat de af te beelden spanning $m$ harmonischen, met de frequenties $2f_o$, $3f_o$, $mf_o$, dan treden in de anodestroom mede de frequenties $2f_z$, $3f_z$, $mf_z$ op.

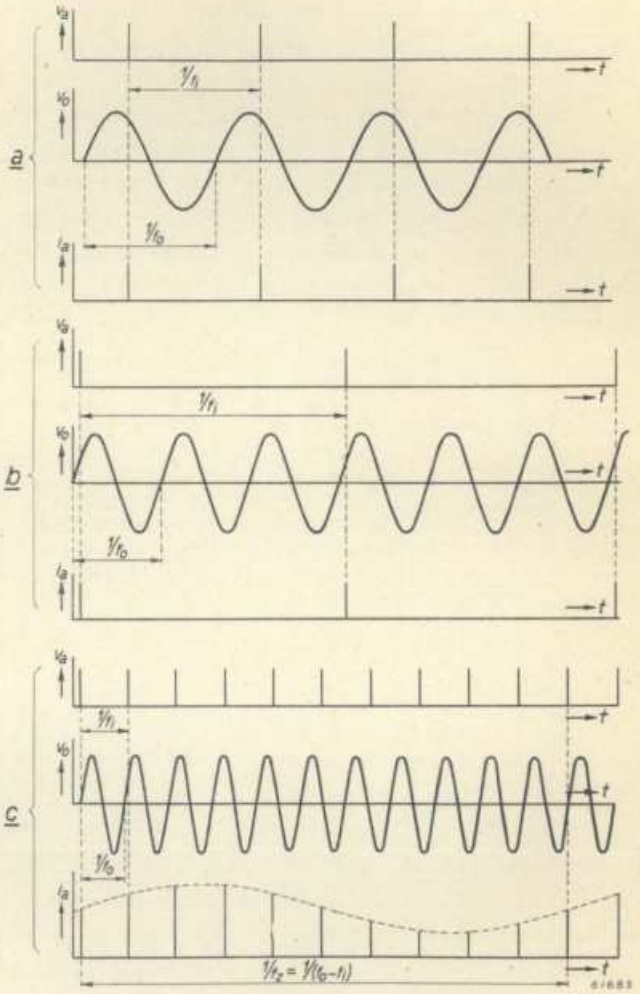



Fig. 2. Schematische voorstelling van het mengproces. Als functie van de tijd $t$ zijn voorgesteld: $v_a$ = aan de anode toegevoerde spanningsimpulsen, $v_o$ = wisselspanning aan het stuurrooster van de mengbuis, $i_a$ = anodestroomimpulsen. Bij (*a*) is de frequentie $f_o$ van $v_o$ gelijk aan de herhalingsfrequentie $f_i$ der impulsen, bij (*b*) is $f_o = 3f_i$, en bij (*c*) bestaat tussen $f_o$ en $f_i$ slechts een klein verschil. In dit laatste geval vormt de reeks anodestroomimpulsen een puntsgewijze afbeelding van $v_o$ en treedt de frequentie $f_z = f_o - f_i$ (in het algemeen $|f_o - nf_i|$ ) in de plaats van $f_o$.

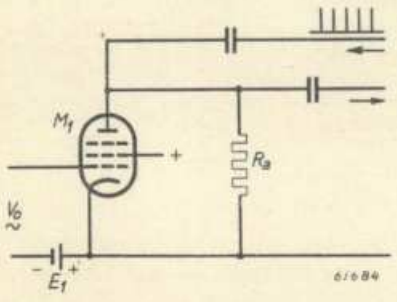



Fig. 1. Schakeling van een mengbuis (penthode $M_1$), waarin de oscillografisch af te beelden wisselspanning $v_o$ wordt gemengd met aan de anode toegevoerde periodieke spanningsimpulsen. $R_a$ anodeweerstand, waarvan de uitgangsspanning wordt afgenomen.

De analogie met stroboscopische belichting dringt zich hierbij op: in de beide eerstgenoemde gevallen ($f_o = f_i$ en $f_o = nf_i$) corresponderen de impulsen met synchrone lichtflitsen, waarbij het belichte, periodiek bewegende voorwerp (frequentie $f_o$) geheel stil schijnt te staan; in het geval dat overeenkomt met $f_o$ iets verschillend van $nf_i$ daarentegen schijnt het voorwerp langzaam te bewegen. Dit laatste geval is juist dat waarom het ons bij de „stroboscopische" oscillograaf te doen is:

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



de amplituden van de anodestroomimpulsen vormen dan een „afbeelding" (zij het slechts van een eindig aantal punten) van de wisselspanning op het stuurrooster, en de grondfrequentie van de anodestroom, $f_z = |f_o - nf_i|$, kan men veel lager maken dan $f_o$. In dit laatste schuilt het essentiële voordeel van de stroboscopische methode voor die gevallen waarin $f_o$ boven het bereik van een gewone oscillograaf ligt.

Een stroboscopische oscillograaf zou men in beginsel op de volgende wijze kunnen inrichten: in de anodeketen van de penthode (die wij voortaan de mengbuis zullen noemen, aangezien de spanning $v_o$ hierin met de impulsen wordt gemengd [4])) neemt men een weerstand $R_a$ op (fig. 1 en *fig. 3*); van

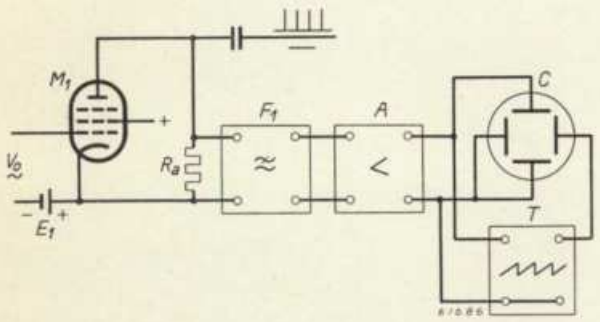



Fig. 3. Blokschema van een stroboscopische oscillograaf met eenparige aftasting. $v_o$ af te beelden spanning, $M_1$ mengbuis met een anodeweerstand $R_a$, $F_1$ laag doorlatend filter, $A$ laagfrequentversterker, $C$ kathodestraalbuis, $T$ generator van een zaagtandspanning, waarvan de frequentie is gesynchroniseerd met de uit de versterker $A$ betrokken frequentie $f_z$.

de spanning over $R_a$ zeeft men met behulp van een laag doorlatend filter alleen de lage frequenties ($f_z$ en haar harmonischen) uit, en de uitgangsspanning van het filter wordt, na versterking, toegevoerd aan de platen voor de verticale afbuiging van een kathodestraalbuis.

Om het beeld een lineaire tijdschaal te verschaffen, moet men de spanning voor horizontale afbuiging de vorm van een lineaire zaagtand geven; immers ook de faze van de aftastende impuls ten opzichte van de af te beelden wisselspanning neemt lineair met de tijd toe. Ten einde bovendien een stilstaand beeld te krijgen, moet men de zaagtandspanning de frequentie $f_z$ geven (of een frequentie waarvan $f_z$ een veelvoud is).

De herhalingsfrequentie $f_i$ der impulsen moet zodanig instelbaar zijn dat een veelvoud van deze frequentie, $nf_i$, voldoende dicht bij $f_o$ kan worden gebracht om $f_z = |f_o - nf_i|$ een waarde te geven die beneden de afsnijfrequentie van het filter ligt. En dit moet het geval zijn voor iedere waarde van $f_o$ tussen zo ruim mogelijke grenzen; dank zij de factor $n$, waarover men vrij kan beschikken, behoeft $f_i$ slechts binnen een beperkt gebied regelbaar te zijn. Bevat $v_o$ harmonischen, tot en met de $m$de, dan moet ook $mf_z$ nog door het filter worden doorgelaten.

Hoewel het in beginsel mogelijk is een oscillograaf volgens de hier ontwikkelde gedachtengang in te richten, zou men bij de uitvoering op grote moeilijkheden stuiten. Met $f_o$ bijv. = 30 MHz, en dus $nf_i$ slechts weinig van dit bedrag verschillend, zou $f_i$ veel minder mogen verlopen dan in de practijk te realiseren is; 1 $^0/_{00}$ verandering van $nf_i$ betekent dan reeds een verandering van 30 000 Hz in $f_z$. Daardoor zouden $f_z$ en in nog sterkere mate eventuele veelvouden van $f_z$ boven de afsnijfrequentie van het filter kunnen komen te liggen. Bovendien zou het ondoenlijk zijn, de zaagtandgenerator van de tijdasspanning met een zo variabele $f_z$ gesynchroniseerd te houden.

Bij de hieronder beschreven methode is deze moeilijkheid vermeden en wordt daarenboven een nieuwe mogelijkheid geopend.

### Fazemodulatie van de impulsen

Volgens de door ons toegepaste methode worden de impulsen periodiek in faze (of, zo men wil, in plaats) gemoduleerd. Dit betekent een modulatie van de herhalingsfrequentie $f_i$, waarvan de gemiddelde (of centrale) waarde $f_{ic}$ nu zo is gekozen dat $nf_{ic} = f_o$ is.

Gemiddeld is de impulsgenerator dus met de frequentie $f_o$ gesynchroniseerd. Liet men de fazemodulatie achterwege, dan zouden de impulsen voortdurend eenzelfde punt van de spanningskromme aftasten (fig. 2*b*), doch door ze „heen en weer te bewegen" — dwz. door ze periodiek in faze te moduleren —, laat men ze verschillende punten van de $v_o$-kromme aftasten.

In de plaats van het lineair met de tijd aangroeiende fazeverschil van de vorige methode is hier dus een fazeverschil getreden dat volgens een periodieke tijdfunctie wisselt. Welke periodieke functie men hiervoor kiest, is in eerste instantie onverschillig, alleen dient men, ter wille van een lineaire tijdschaal, voor de horizontale afbuiging een spanning te gebruiken die dezelfde periodieke functie van de tijd is als het fazeverschil. Voor beide functies zou men bijv. eenzelfde zaagtandfunctie kunnen nemen, doch het is wel zo eenvoudig een sinusfunctie te gebruiken, vooral indien men als frequentie hiervan de netfrequentie kiest. Dat een

[4]) De verhouding der amplitude van de anodestroomcomponent met frequentie $f_z$ tot de amplitude van de grondgolf van $v_o$ zullen we ook hier de conversiesteilheid noemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



zo lage frequentie voordelig is, zal aanstonds blijken. Een en ander wordt verduidelijkt door *fig. 4*, waarin bij (*a*) een periode van de af te beelden spanning $v_o$ (gesuperponeerd op een roostervoorspanning $E_1$) is weergegeven en bij (*b*) de aftastende impuls in de ruststand (bij afwezigheid van fazemodulatie).

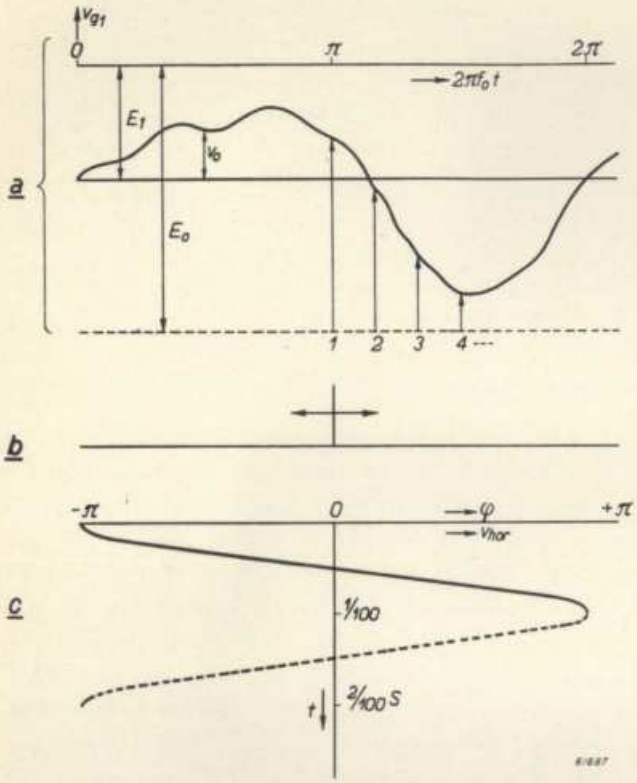



Fig. 4. Aftasting met in faze gemoduleerde impulsen. *a*) Roosterspanning $v_{g1}$ van de mengbuis, bestaande uit de voorspanning $E_1$ en de af te beelden spanning $v_o$. Bij de roosterspanning $E_0$ is de buis juist afgeknepen. *b*) Ruststand van de spanningsimpuls op de anode. *c*) Faze $\varphi$ van de om de ruststand zwaaiende impulsen, en tevens spanning $v_{hor}$ voor de horizontale afbuiging, als functie van de verticaal naar beneden uitgezette tijd $t$. De frequentie van $\varphi$ en $v_{hor}$ is de netfrequentie (50 Hz).

Laat men nu de faze $\varphi$ van de impuls sinusvormig met de tijd $t$ variëren, dan tast de impuls bij het zwaaien van $-\pi$ naar $+\pi$ (fig. 4*c*) achtereenvolgens een aantal punten van de $v_o$-kromme af. In fig. 4*a* is met de verticale pijltjes *1*, *2*, *3*... — waarvan de voetpunten liggen op het niveau $E_0$, d.i. de roosterspanning waarbij de mengbuis tijdens het optreden van een impuls juist is afgeknepen — de amplitude van enige opeenvolgende anodestroomimpulsen aangegeven, die „momentopnamen" van de $v_o$-kromme zijn. De laagfrequente componenten van de anodestroom, met de frequentie van de fazemodulatie en een reeks veelvouden van deze frequentie (afkomstig van het frequentiespectrum van de fazemodulatie), bewerkstelligen de verticale afbuiging van de electronenbundel in de kathodestraalbuis. Synchroon en in faze met de beweging van de impuls varieert $v_{hor}$ (fig. 4*c*), die de horizontale afbuiging veroorzaakt. Op het scherm krijgt men dus een kromme te zien die — mits de momentopnamen voldoende talrijk zijn — een getrouwe afbeelding is van één periode van de $v_o$-kromme.

Tijdens de teruggaande beweging van de impuls ($\varphi$ variërend van $+\pi$ tot $-\pi$ volgens het gestippelde gedeelte van de sinuslijn in fig. 4*c*) zou men de impuls dezelfde $v_o$-kromme nog eens kunnen laten aftasten. De lichtvlek op het scherm zou dan dezelfde kromme beschrijven als zoëven, echter in omgekeerde richting, daar $v_{hor}$ nu in tegengestelde zin verandert. Een nuttiger gebruik van de teruggaande beweging kan men maken door de impuls hierbij een andere spanningskromme te laten aftasten, zodat men de oscillogrammen van twee spanningen ($v_{oI}$ en $v_{oII}$) tegelijk te zien krijgt. (Eventueel kan $v_{oII}$ nul zijn; dan beschrijft de lichtvlek bij het teruggaan de nullijn.) Wij zullen later zien hoe het beurtelings aftasten van twee krommen met een eenvoudige electronische schakelaar kan worden uitgevoerd.

In fig. 4 is de amplitude van $\varphi$ (de „fazezwaai" van de impuls) gelijk gemaakt aan een halve periode van $v_o$, zodat van de $v_o$-kromme juist een gehele periode wordt afgetast. Niets belet ons echter, de zwaai groter of kleiner te maken en zodoende een gedeelte te doen aftasten dat meer resp. minder dan een periode omvat. Daar dit aftasten in dezelfde tijd ($^1/_{100}$ s) geschiedt als waarin de horizontale beweging één halve periode volbrengt, beslaat het afgetaste gedeelte steeds de volle breedte van het oscillogram. Door de impuls een kleine zwaai te geven, en bovendien de ruststand waar hij omheen zwaait instelbaar te maken, kan men een willekeurig stukje van de $v_o$-kromme als het ware „microscopisch" waarnemen, wat voor het bestuderen van een bepaald detail van grote waarde is. Bij de hiervóór genoemde methode (impulsen die met constante snelheid langs de $v_o$-kromme lopen) bestaat deze mogelijkheid niet.

In *fig. 5* is aangegeven hoe een stroboscopische oscillograaf met sinusvormig in faze gemoduleerde impulsen kan zijn ingericht. (Hoewel in de eigenlijke stroboscopie fazemodulatie van de lichtflitsen niet gebruikelijk is, blijven we ons hier toch maar van de term „stroboscopisch" bedienen.) Evenals bij de schakeling volgens fig. 3 het geval was, bewerkstelligt de uitgangsspanning van de mengbuis $M_1$, via een filter en een versterker, de verticale afbuiging. Een oscillator $O$, die een sinusvormige spanning levert, wordt gesynchroniseerd met een van buiten toegevoerde spanning $v_{syn}$, die synchroon moet zijn met $v_o$ (eventueel kan $v_{syn}$ de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



spanning $v_o$ zelf zijn). De uitgangsspanning van deze oscillator synchroniseert op haar beurt een impulsgenerator $I_1$, waaraan bovendien een sinusvormige spanning $v_\varphi$ van 50 Hz wordt toegevoerd, die de impuls in faze moduleert. De frequentie van de oscillator is dezelfde als de herhalingsfrequentie

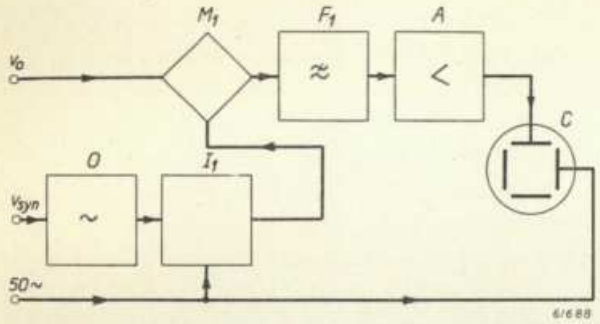



Fig. 5. Elementair blokschema van een stroboscopische oscillograaf met sinusvormige fazemodulatie. $v_o$, $M_1$, $F_1$, $A$ en $C$ als in fig. 3. $I_1$ impulsgenerator, die via de oscillator $O$ wordt gesynchroniseerd met een onderharmonische van de synchronisatiespanning $v_{syn}$ (synchroon met $v_o$), en die door de netspanning in faze wordt gemoduleerd.

der impulsen, waarvoor wij, om redenen die straks zullen worden uiteengezet, als centrale waarde $f_{ic}$ omstreeks 100 000 Hz hebben gekozen; $f_{ic}$ wordt zo ingesteld dat een harmonische ervan juist gelijk wordt aan de frequentie $f_o$.

Op bijzonderheden van deze onderdelen zullen wij in een volgend artikel terugkomen.

## Beperkingen van de stroboscopische oscillograaf

Wij willen ons nu eerst afvragen met welke beperkingen men bij een stroboscopische oscillograaf rekening moet houden en welke grenzen hierdoor aan het gebruik van zulk een toestel worden gesteld.

Uit het voorgaande zal genoegzaam zijn gebleken dat de „gegevens" voor het oscillogram slechts uit een eindig aantal punten bestaan (de toppen van de anodestroomimpulsen; zie bijv. fig. 2c). De vraag is, in hoeverre deze punten, ondanks de er tussen liggende hiaten, een getrouwe afbeelding van de oorspronkelijke $v_o$-kromme kunnen leveren.

Het tweede punt dat wij nader zullen moeten beschouwen, is de duur van de impulsen. Tot nu toe hebben wij stilzwijgend ondersteld dat deze duur oneindig klein is. Zulke impulsen zijn natuurlijk niet te verwezenlijken. Men moet dus werken met impulsen die een eindige duur hebben. Evenals het eindig zijn van de duur van een stroboscopische lichtflits een zekere bewegingsonscherpte van het waargenomen voorwerp tot gevolg heeft, zo gaan ook bij een eindige impulsduur bepaalde details van de $v_o$-kromme verloren; met andere woorden: het scheidend vermogen van de impulsen waarmee men moet werken, is niet onbeperkt.

Wij bespreken nu achtereenvolgens de kwestie der hiaten en die van de impulsduur.

### *Hiaten in het oscillogram*

Bevat de $v_o$-kromme $m$ harmonischen, dan is zij door $2m + 1$ punten van een periode gedefinieerd, aangezien door dit aantal punten de $2m + 1$ coëfficienten van de reeks van Fourier, namelijk $m$ coëfficienten van sinustermen, $m$ coëfficienten van cosinustermen en de constante term (gelijkspanningscomponent), zijn vastgelegd. Zijn van een periode der kromme $p$ punten gegeven, dan ligt hierdoor — ondanks de hiaten tussen deze punten — de kromme volledig vast indien $p \geqq 2m + 1$, of

$$p > 2m. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Is aan deze voorwaarde niet voldaan, dan is de beste benadering die men uit de ontoereikende gegevens kan afleiden, de kromme met niet meer dan $m' = \frac{1}{2}p < m$ harmonischen die aan de gegevens voldoen. Ten einde met een stroboscopische oscillograaf zoveel mogelijk harmonischen te kunnen weergeven, moet men dit toestel dus zo inrichten dat de afbeelding uit een zo groot mogelijk aantal punten bestaat. Dit betekent dat de snelheid van aftasten (de snelheid waarmee de impulsen zich langs de $v_o$-kromme verplaatsen) zo klein mogelijk moet zijn.

Om dit nader kwantitatief uit te werken, willen wij eerst aannemen dat we weer hebben te doen met het geval waarmee we hierboven onze beschouwingen over de stroboscopische oscillograaf aanvingen, namelijk het geval van een constante herhalingsfrequentie $f_i$ der impulsen welker $n$de harmonische iets verschilt van de grondfrequentie $f_o$ der spanning $v_o$. De aftastsnelheid is dan constant, overeenkomende met de constante verschilfrequentie $f_z = |f_o - nf_i|$ en met aequidistante „meetgegevens" (anodestroomimpulsen). Men kan gemakkelijk verifiëren dat $f_i/f_z$ het aantal punten $p$ is dat het aftasten van één periode der $v_o$-kromme oplevert. Om van deze kromme de $m$de harmonische nog te kunnen waarnemen, moet men dus zorgen dat is voldaan aan de voorwaarde

$$\frac{f_i}{f_z} > 2m. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Een soortgelijke voorwaarde geldt voor de in werkelijkheid toegepaste methode, waarbij de impuls in faze, en dientengevolge ook in frequentie, wordt gemoduleerd. De „meetgegevens" zijn nu niet

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



meer aequidistant, zoals in het zoëven beschouwde geval, maar zij liggen bij kleine ogenblikswaarden van de fazezwaai ($\varphi \approx 0$), waar de impuls snel loopt, verder uiteen dan bij grote ($\varphi \approx +$ of $-\Delta\varphi$), waar hij zich slechts langzaam verplaatst. Met andere woorden: het middelste gedeelte van het oscillogram dat men te zien krijgt, is uit minder meetgegevens gereconstrueerd dan de gedeelten links en rechts daarvan. Om in dit middelste gedeelte dezelfde „dichtheid van meetgegevens" te krijgen als bij eenparige aftasting, moet dus aan (2) nog zijn voldaan, als men voor $f_z$ de maximale waarde substitueert.

Daar de frequentie $\nu = 50$ Hz, waarmee de fazemodulatie geschiedt, zeer laag is vergeleken met $f_{ic} \approx 100\,000$ Hz, mogen we de toestand beschouwen als quasi-stationnair en spreken van de momentele herhalingsfrequentie $f_i'$ der impulsen, welke sinusvormig zwaait om de centrale herhalingsfrequentie $f_{ic} = f_o/n$. Er ontstaat nu ook een variabele verschilfrequentie $f_z' = |f_o - nf_i'|$, waarvoor we, naar hieronder wordt afgeleid, de uitdrukking $|\nu \cdot \Delta\varphi \cdot \sin 2\pi\nu t|$ vinden (hierin is $\Delta\varphi$ de fazezwaai van de impulsen, uitgedrukt in radialen van de $v_o$-kromme).

Is $2\pi f_{ic} t + \psi$ de faze van de ongemoduleerde impuls ($\psi$ is een willekeurige constante), dan kan de faze van de gemoduleerde impuls worden voorgesteld door $2\pi f_{ic} t + \psi + (\Delta\varphi/n)\cos 2\pi\nu t$, waarin $\Delta\varphi/n$ de fazezwaai is, uitgedrukt in radialen van de impulsenreeks.

De momentele hoekfrequentie van de impulsen is gedefinieerd als de afgeleide van de faze naar de tijd [5]), dus $2\pi f_{ic} - 2\pi\nu \cdot (\Delta\varphi/n) \cdot \sin 2\pi\nu t$, en de momentele frequentie $f_i'$ zelf is derhalve

$$f_i' = f_{ic} - \nu \cdot (\Delta\varphi/n) \cdot \sin 2\pi\nu t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Voor de momentele verschilfrequentie $f_z'$ vinden we nu: $f_z' = |f_o - nf_i'| = |\nu \cdot \Delta\varphi \cdot \sin 2\pi\nu t|$, daar $nf_{ic} = f_o$.

Substitueert men in (2) voor $f_z$ de maximale waarde van $f_z' = |\nu \cdot \Delta\varphi \cdot \sin 2\pi\nu t|$, dus $f_{z'\max} = \nu \cdot \Delta\varphi$, dan komt er:

$$\frac{f_{ic}}{\nu \cdot \Delta\varphi} > 2m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Voor het geval dat juist één periode van de $v_o$-kromme wordt afgetast, moet $\Delta\varphi = \pi$ radialen zijn (vgl. fig. 4c), zodat (4) dan overgaat in

$$\frac{f_{ic}}{2\pi\nu} > m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4a)$$

Uit deze formules blijkt dat het gunstig is de centrale herhalingsfrequentie $f_{ic}$ der impulsen hoog te kiezen en de frequentie der fazemodulatie ($\nu$) laag. Wat deze laatste betreft, ligt het voor de hand voor $\nu$ de netfrequentie te kiezen. Een nog lagere frequentie heeft het nadeel dat men haar speciaal zou moeten opwekken, en bovendien dat men al spoedig zou vastlopen op flikkeren van het beeld, aangezien immers de tijdbasis ook de frequentie $\nu$ moet hebben.

Met $f_{ic} \approx 100\,000$ Hz (zie volgende paragraaf) en $\nu = 50$ Hz vindt men uit (4a), bij aftasting van een volledige periode, als hoogste ranggetal van de harmonische die men nog kan waarnemen: $m = 10^3/\pi \approx 300$. Wordt minder dan een periode afgetast („microscopische aftasting", $\Delta\varphi < \pi$), dan reikt het scheidend vermogen tot harmonischen van een $\pi/\Delta\varphi$ maal zo hoog ranggetal.

Men zou kunnen menen dat de formules (4) en (4a) alleen gelden voor het zeer bijzondere geval dat $f_{ic}$ en dus ook $f_o$ precies een veelvoud zijn van $\nu$, aangezien dan bij iedere zwaai telkens weer dezelfde punten van de $v_o$-kromme worden afgetast, en dat dus in alle overige gevallen, waarin telkens weer andere punten aan de beurt komen, aan de genoemde voorwaarden niet behoeft te worden voldaan. Dit is echter onjuist. Uit een nadere analyse blijkt, dat het aankomt op het aantal punten dat bij één zwaai van de impuls wordt afgetast, onafhankelijk er van of bij volgende zwaaien dezelfde dan wel andere punten aan de beurt komen, onafhankelijk dus van toevallige waarden der verhouding $f_{ic}/\nu$. Wij zullen trouwens aanstonds de betrekkingen (4) en (4a) nogmaals afleiden op een wijze waaruit deze onafhankelijkheid blijkt.

### *Duur van de impuls*

In de vorige paragraaf hebben we gezien dat men, bij oneindig smalle impulsen, van de af te beelden $v_o$-kromme slechts harmonischen tot een beperkt ranggetal ($m$) kan waarnemen, onafhankelijk van de grondfrequentie $f_o$. Deze beperking is een gevolg van de hiaten. Uit het volgende zal blijken dat de in werkelijkheid eindige impulsbreedte een absolute beperking oplegt aan de frequentie waarvoor een stroboscopische oscillograaf nog bruikbaar is. Bevat de $v_o$-kromme harmonischen met een frequentie hoger dan deze grensfrequentie $f_{\max}$, dan worden die harmonischen niet (of gebrekkig) weergegeven, ook al zou hun ranggetal de bovengenoemde grens $m$ niet te boven gaan.

Als de trillingstijd van de af te beelden spanning van dezelfde orde van grootte wordt als de duur $\tau$ der impulsen is, nemen de conversiesteilheid van het mengproces, en derhalve de gevoeligheid van het instrument, sterk af. Betreffende de grensfrequentie $f_{\max}$ kan men dus zeggen dat ze een orde van grootte $= 1/\tau$ heeft.

Om deze uitspraak nader te preciseren, moet

[5]) Zie bijv. Th. J. Weyers, Frequentiemodulatie, Philips techn. T. 8, 42-50, 1946, in het bijzonder blz. 44.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



men bedenken dat bij een frequentie gelijk aan $1/\tau$ de gevoeligheid nul wordt, althans bij een rechthoekige vorm van de impulsen (*fig. 6*). Immers, bij een frequentie $= 1/\tau$ past in de impulsbreedte juist een periode van de spanning $v_o$,

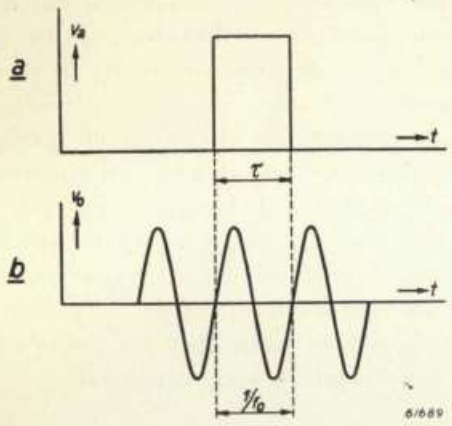



Fig. 6. Rechthoekige anodespanningsimpuls $v_a$ waarvan de duur $\tau$ juist gelijk is aan een periode $1/f_o$ van de af te tasten spanning $v_o$.

zodat de bijdrage die de gemiddelde waarde van de anodestroom van de mengbuis ontvangt van de positieve helft van deze periode, precies wordt gecompenseerd door de bijdrage van de negatieve helft, en de conversiesteilheid dus nul is.

In een volgend artikel zullen wij zien dat de gebruikte impulsen ongeveer de vorm van een halve sinus hebben. Voor deze vorm geldt eveneens dat de conversiesteilheid nul wordt bij een frequentie $= 1/\tau$, mits men onder $\tau$ een soort gemiddelde breedte van de impuls verstaat, die ongeveer $^2/_3$ van de breedte aan de basis is.

Om ver genoeg van de toestand met conversiesteilheid nul af te blijven, kan men als grensfrequentie stellen:

$$f_{max} \approx \frac{1}{2\tau} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Met een impulsduur in de orde van $10^{-8}$ s — op de moeilijkheden die aan het opwekken van impulsen van nog kortere duur in de weg staan, komen we in een volgend artikel terug — volgt hieruit: $f_{max} \approx 50$ MHz.

Gebruik makend van de in de vorige paragraaf verkregen uitkomsten, kunnen we tot een betrekking komen tussen de centrale herhalingsfrequentie $f_{ic}$ der impulsen, de frequentie $\nu$ der fazemodulatie en de grensfrequentie $f_{max}$ (resp. de impulsduur $\tau$).

Stel dat de grondfrequentie van de af te beelden spanning $v_o$ de laagste waarde heeft die nog voor stroboscopische aftasting in aanmerking komt, dus $f_o = f_{ic}$. Tevens onderstellen we dat de hoogste aanwezige ($m$de) harmonische van $v_o$ juist de frequentie $f_{max}$ heeft. Dan is dus $m = f_{max}/f_{ic}$. En tevens wensen we dat de $m$de harmonische juist de hoogste is die, met het oog op de hiaten, kan worden weergegeven, zodat de voorwaarde (4) geldt. De fazezwaai zij zo groot dat hij, gemeten op de schaal van de frequentie $f_{ic}$, die altijd ongeveer dezelfde waarde heeft, $\pi$ radialen bedraagt. In het hier beschouwde geval ($f_o = f_{ic}$) is hij dan eveneens $\pi$ radialen op de bij $f_o$ behorende schaal en dus juist voldoende om één periode van de $v_o$-kromme af te tasten; in andere gevallen ($f_o > f_{ic}$, $n > 1$) kan dan meer dan een periode worden afgetast. De voorwaarde (4) moet nu worden toegepast in de vorm (4*a*), en met $m = f_{max}/f_{ic}$ gaat deze over in:

$$\frac{f_{ic}}{2\pi\nu} > \frac{f_{max}}{f_{ic}},$$

of

$$f_{ic}^2 > 2\pi\nu f_{max} \approx \frac{\pi\nu}{\tau}.$$

Uit deze betrekking volgt, met $\tau$ in de orde van $10^{-8}$ s en $\nu = 50$ Hz : $f_{ic} >$ ca 100 000 Hz. Daar de herhalingsfrequentie der impulsen de onderste grens

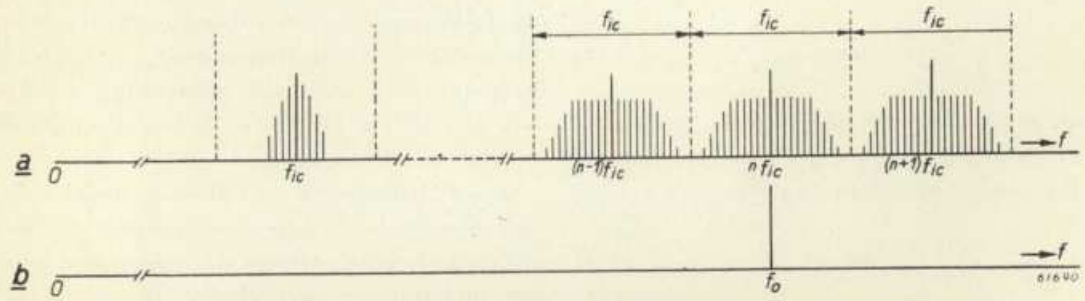



Fig. 7. Frequentiespectrum, (*a*) van de in faze gemoduleerde impulsen, (*b*) van de sinusvormige spanning $v_o$. (Bij (*a*) zijn noch het aantal componenten van de zijbanden, noch de intensiteit der componenten, op schaal weergegeven; slechts is schematisch aangeduid dat de zijbanden van de harmonischen van $f_{ic}$ rijker aan componenten zijn dan de zijbanden van $f_{ic}$ zelf, en dat de buitenste componenten van de zijbanden veel zwakker zijn dan het merendeel der meer naar binnen liggende componenten.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



vormt van het frequentiegebied van de oscillograaf, is, om dit gebied zo groot mogelijk te houden, $f_{ic}$ niet hoger gekozen dan nodig is, dus ongeveer 100 000 Hz, welke waarde in het bovenstaande al meermalen werd vermeld.

**Afsnijfrequentie van het filter**

Met de grootte van $f_{ic}$ hangt de vereiste afsnijfrequentie van het laag doorlatend filter ($F_1$, fig. 5) onmiddellijk samen. Dit is als volgt in te zien.

In *fig. 7* is bij (*a*) een gedeelte van het frequentiespectrum van de in faze gemoduleerde impulsen getekend: men ziet de grondfrequentie $f_{ic}$ en enige harmonischen, $(n-1)\,f_{ic}$, $nf_{ic}$ en $(n+1)\,f_{ic}$, die reeds bij ongemoduleerde impulsen aanwezig zouden zijn, benevens de zijbanden, die het gevolg zijn van de fazemodulatie; de afstand tussen twee naburige lijnen van de zijbanden is de modulatiefrequentie $\nu$. Bij (*b*) is het uit één lijn bestaande spectrum van de spanning $v_o$ weergegeven (eventuele harmonischen van $v_o$ doen hier niet ter zake); deze lijn ligt bij $f_o = nf_{ic}$. Het mengen van de beide spectra doet talloze verschilfrequenties ontstaan (de verschillen tussen $f_o$ en alle frequenties van het spectrum der gemoduleerde impulsen). Van al deze frequenties moet het filter alleen die doorlaten welke zijn voortgekomen uit $f_o$ en de zijbanden van $nf_{ic}$; frequenties die het verschil zijn van $f_o$ en andere zijbanden — in het bijzonder de naburige zijbanden van $(n-1)\,f_{ic}$ en $(n+1)\,f_{ic}$ — moeten worden onderdrukt. Hieruit volgt, dat de afsnijfrequentie van het filter hoogstens $f_{ic}/2 \approx 50\,000$ Hz mag bedragen.

Tevens volgt uit deze beschouwingen dat de zijbanden eigenlijk niet over elkaar heen mogen vallen, dus dat zij geen grotere breedte dan $f_{ic}/2$ mogen hebben; met andere woorden: dat zij zich in fig. 7 niet tot voorbij de verticale stippellijnen mogen uitstrekken. Strikt genomen doen zij dit wel, daar zij uit oneindig veel termen bestaan, doch indien, zoals hier, de toestand als quasi-stationnair is te beschouwen ($\nu \ll f_{ic}$), is het gedeelte van de zijband dat buiten de frequentiezwaai valt, zo klein van amplitude dat het kan worden verwaarloosd.

De voorwaarde waaraan moet zijn voldaan opdat de zijbanden elkaar niet overdekken, luidt dus dat geen der harmonischen van de impulsfrequentie een grotere frequentiezwaai mag maken dan $f_{ic}/2$. Voor de *n*de harmonische (behorende bij de grondfrequentie $f_o$) is de frequentiezwaai, zoals volgt uit de boven afgeleide verg. (3), $\nu \cdot \Delta\varphi$. Heeft de $v_o$-kromme harmonischen met $m$ als hoogste ranggetal, dan maakt het daarmee corresponderende $mn$-voud van de impulsfrequentie de zwaai $m\nu \cdot \Delta\varphi$. Dit is de grootste van alle in aanmerking komende frequentiezwaaien, en dat deze kleiner moet zijn dan $f_{ic}/2$ leidt onmiddellijk tot

$$\frac{f_{ic}}{2\nu \cdot \Delta\varphi} > m,$$

en, met $\Delta\varphi = \pi$ (aftasten van één periode van $f_o$), tot

$$\frac{f_{ic}}{2\pi\nu} > m\,,$$

waarmee langs andere weg de voorwaarden (4) en (4a) zijn teruggevonden.

De electrische uitvoering van een aantal onderdelen van een experimentele stroboscopische oscillograaf, zoals de impulsgenerator, de inrichting voor het synchroniseren enz., komt in een volgend artikel ter sprake.

---

**Samenvatting.** Beschreven wordt een nieuw principe voor een kathodestraaloscillograaf, dat veel belooft voor het onderzoek van spanningen met zeer hoge frequenties en dat nauwe verwantschap vertoont met het bekende stroboscopische beginsel. Volgens dit principe wordt in een mengbuis de af te beelden spanning gemengd met een periodieke, in faze gemoduleerde, impulsvormige spanning; de centrale herhalingsfrequentie van de impulsen wordt zo ingesteld dat een harmonische ervan juist gelijk is aan de frequentie van de af te beelden spanning. De anodestroom van de mengbuis bestaat uit impulsen, die, in een laagfrequent rhythme, als het ware momentopnamen van de af te beelden spanning leveren. De door een filter uitgezeefde laagfrequente componenten van de anodestroom bewerkstelligen de verticale afbuiging in de kathodestraalbuis. Liet men de fazemodulatie van de impulsen achterwege, dan zouden de impulsen telkens eenzelfde punt van de spanningskromme „aftasten". Door echter de impulsen periodiek in faze te moduleren, kan men ze, al naar de grootte van de fazezwaai, naar keuze een groter of kleiner gedeelte van de kromme laten aftasten. Op de kathodestraalbuis wordt een stilstaand beeld met lineaire tijdschaal verkregen door de horizontale afbuiging volgens eenzelfde tijdsfunctie te doen geschieden als de fazemodulatie. Het heeft voordelen, voor deze tijdsfunctie een sinusfunctie met de netfrequentie te kiezen. Nagegaan wordt wat de invloeden zijn van de hiaten tussen de „momentopnamen", waaruit het oscillogram moet worden gereconstrueerd, en van de eindige duur van de gebruikte impulsen.

---

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# DE VERDELING VAN DE VERLICHTINGSSTERKTE IN EEN VLAK EVENWIJDIG AAN EEN BUISVORMIGE LICHTBRON

door J. LOEB *).

535.245.1:628.932.1

*Vóór de uitvinding van de buisvormige fluorescentielampen werden nagenoeg uitsluitend lampen gebruikt die als puntvormige lichtbronnen konden worden beschouwd. In de handboeken over verlichtingskunde wordt aangegeven, hoe men de verlichtingssterkten die deze lichtbronnen in een gegeven vlak leveren, kan bepalen. Nu het gebruik van buisvormige lichtbronnen steeds meer toeneemt, is het van belang over een methode te beschikken waarmede ook bij dergelijke lampen de verlichtingssterkten in een vlak gemakkelijk kunnen worden berekend. Bij de hier besproken methode kan men volstaan met het raadplegen van een op eenvoudige wijze ingerichte tabel.*

Aan het berekenen van de verlichtingssterkte bij het gebruik van buisvormige lichtbronnen is in dit tijdschrift vroeger reeds een tweetal artikelen gewijd [1][2]). Ook in andere periodieken zijn meermalen onderzoekingen gepubliceerd die zich met dit probleem bezighouden. In het bijzonder denken we daarbij aan een verhandeling die K. Norden [3]) reeds in 1908 in het licht gaf.

Nu de toepassing van buisvormige lampen, voornamelijk TL-lampen, steeds algemener wordt, is het van belang, dat ieder die wel eens berekeningen heeft uit te voeren over verlichtingssterkten bij gebruik van deze lampen, de beschikking heeft over een middel waarmede deze verlichtingssterkten op eenvoudige wijze kunnen worden bepaald.

Daar de diameter van een buisvormige lamp steeds klein is ten opzichte van de lengte, bestaat er geen bezwaar tegen, de lamp schematisch als een lichtlijn te beschouwen. In het vervolg van dit artikel zal daarom steeds van lijnvormige lichtbronnen worden gesproken. In sommige onderzoekingen wordt genoegen genomen met een benaderende oplossing, waarbij de lijnvormige lichtbron als puntvormig wordt beschouwd. In de practijk is deze benadering voldoende indien het punt waarvoor de berekening moet worden gemaakt, zich op een behoorlijk grote afstand van de lamp bevindt (vgl. [1])). Om echter ook op geringe afstanden van de lichtbron nauwkeurige uitkomsten voor de verlichtingssterkte te vinden, zullen we de zo juist genoemde benadering vermijden. Wel zullen we onderstellen, dat de lichtbron straalt volgens de wet van Lambert.

In dit artikel zullen we ons beperken tot het bestuderen van de verlichtingssterkten in een horizontaal vlak ten gevolge van de directe verlichting door een lijnvormige lichtbron (of enkele met het vlak evenwijdige lichtbronnen) die aangebracht is in een hoger gelegen horizontaal vlak, bijv. langs de zolder van het lokaal. Dit is het geval dat in de practijk het meeste voorkomt, daar men dikwijls moet weten, hoe groot de verlichtingssterkte is op een horizontale tafel, bijv. in een werkruimte, met een algemene verlichting aan de zolder of een plaatselijke verlichting met lampen evenwijdig aan het tafelvlak. Deze berekening kan worden uitgevoerd voor lampen zonder en met armatuur. Het is ook mogelijk op overeenkomstige wijze de verdeling van de verlichtingssterkte te bepalen in een ten opzichte van de lamp geheel willekeurig gelegen vlak en daarbij bovendien met voldoende benadering rekening te houden met het licht dat door het plafond en de wanden van het vertrek waarin de lamp is geplaatst wordt teruggekaatst [4]).

## Lamp zonder armatuur

We beschouwen eerst het geval dat een lijnvormige lichtbron zonder armatuur wordt gebruikt. Zij deze lichtbron van de lengte $l$ in een lokaal horizontaal langs het plafond aangebracht, op een hoogte $h$ boven het horizontale werkvlak. Aan de hand van *fig. 1* zullen we nu berekenen, welke verlichtingssterkte een (oneindig klein) element $dl$ van de lamp veroorzaakt in een punt $P$ van het werkvlak. We noemen de uiteinden van de lamp *1* en *2* en de projecties van deze punten op

*) Lampes Philips S.A., Genève.

[1]) N. A. Halbertsma en G. P. Ittmann, Verlichting met lijnvormige lichtbronnen, Philips techn. T. **4**, 193-200, 1939.

[2]) H. Zijl, Het berekenen van verlichtingsinstallaties met lijnvormige lichtbronnen, Philips techn. T. **6**, 147-152, 1941.

[3]) K. Norden, Beleuchtungsberechnungen für Quecksilberdampflampen, Elektrotechn. Z. **28**, 757-758, 1907, en **29**, 883-886, 1908. Zie ook E. L. Matthews, Das Licht **1**, 141-146 en 165-168, 1931.

[4]) Zie J. Loeb, Méthode générale de calcul de la répartition des éclairements dans les installations d'éclairage par lampes à fluorescence et autres sources linéaires, éditeur: Lampes Philips S. A., Genève 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



het werkvlak $1'$ en $2'$. Zij verder de afstand van $P$ tot de lijn $1'2'$ : $PP' = d$, en $P'1' = l_1$, $P'2' = l_2$. De voerstraal van $P$ naar $dl$, ter lengte $r$, maakt met de lijn $PQ$ evenwijdig aan de lamp een hoek $\beta$. Ten slotte zij $\text{arc tg}\, d/h = \alpha$.

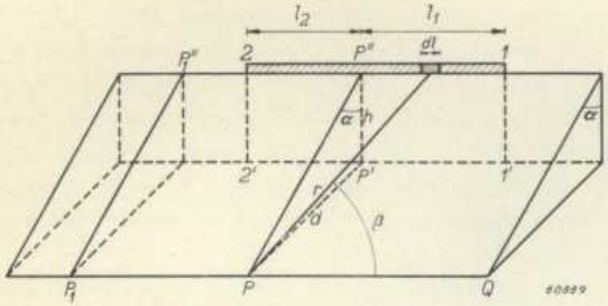



Fig. 1. Berekening van de verlichtingssterkte die het element $dl$ van een aan de zolder bevestigde lamp levert in een punt $P$ van een horizontaal vlak. *1* en *2* zijn de uiteinden van de lamp. De verder in deze figuur voorkomende letters zijn in de tekst toegelicht.

Als de lichtsterkte van het beschouwde element van de lamp (in een richting loodrecht op haar as) $I_0 dl$ bedraagt, is de verlichtingssterkte in $P$, loodrecht op de voerstraal, $I_0\, dl \sin\beta/r^2$. De horizontale verlichtingssterkte die hiermede correspondeert, is:

$$dE = \frac{I_0 dl\, \sin\beta}{r^2} \cdot \frac{h}{r} \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Bij een lijnvormige lichtbron is uit de door de fabrikant opgegeven lichtstroom de waarde van $I_0$ (de lichtsterkte per lengte-eenheid in een vlak loodrecht op de lamp, in cd/m) af te leiden. Deze bedraagt nl. $\Phi/\pi^2 l \approx 0{,}1\, \Phi/l$, waarin $\Phi$ de lichtstroom in lumens en $l$ de lengte in m voorstelt. We moeten er ons echter wel rekenschap van geven, dat de definitie van lichtsterkte waarmede in de verlichtingskunde wordt gewerkt, berust op het gebruik van puntvormige lichtbronnen. De lichtsterkte van een lichtbron in een bepaalde richting is immers vastgelegd door de lichtstroom die uittreedt in een kleine ruimtehoek rondom die richting, gedeeld door deze ruimtehoek. Deze definitie is bij lijnvormige lichtbronnen alleen van toepassing indien de waarnemingen worden verricht op een afstand die groot is ten opzichte van de afmetingen der lamp.

Men kan bij een puntvormige lichtbron met een luxmeter de verlichtingssterkte (in lux) in een punt bepalen en daaruit, als de afstand tot de lichtbron bekend is, de lichtsterkte (in candela) vinden. Bij een lijnvormige lamp kan men uit de aflezing van een luxmeter alleen een „aequivalente lichtsterkte" van de lichtbron afleiden.

Wij zullen $dl$ en $r$, die voorkomen in het tweede lid van formule (1), uitdrukken in $h$, $\alpha$ en $\beta$. Het is duidelijk, dat $dl = r\, d\beta/\sin\beta$, en als we in aanmerking nemen dat $r = \sqrt{d^2 + h^2}/\sin\beta$ en $\sqrt{d^2 + h^2} = h/\cos\alpha$, vinden we, dat $r = h/\cos\alpha \sin\beta$. Bij substitutie van deze uitdrukkingen voor $dl$ en $r$ in betrekking (1) gaat deze over in:

$$dE = \frac{I_0 h \cos^2\alpha \sin^2\beta\, d\beta}{h^2} = \frac{I_0}{h} \cdot \cos^2\alpha \sin^2\beta\, d\beta. \quad (2)$$

De totale verlichtingssterkte in $P$ wordt gevonden door de uitdrukking (2) te integreren tussen de grenzen $\beta_1$ en $\beta_2$, waarin $\beta_1 = \sphericalangle QP1$ en $\beta_2 = \sphericalangle QP2$.

We kunnen daarbij twee gevallen onderscheiden. Eerst nemen we aan, dat het vlak door $P$, loodrecht op de lamp, deze snijdt (in een punt $P''$), zoals in fig. 1 is aangegeven. In dit geval zullen we van de integraal $\int_{\beta_1}^{\beta_2}$ eerst het gedeelte $\int_{\beta_1}^{\pi/2}$ berekenen. Dit levert de verlichtingssterkte in $P$, voor zover deze te danken is aan het gedeelte *1*-$P''$ (ter lengte $l_1$) van de lamp. We vinden hiervoor:

$$E_1 = \frac{I_0}{h} \cos^2\alpha \int_{\beta_1}^{\pi/2} \sin^2\beta\, d\beta =$$

$$= \frac{I_0}{h} \cos^2\alpha \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}\beta_1 + \frac{1}{4}\sin 2\beta_1\right). \quad (3)$$

De ligging van $P$ is vastgelegd door de afstand $d$ en de lengte $l_1$. Daar $\cos\alpha = 1/\sqrt{1 + d^2/h^2}$ en $\text{tg}\,\beta_1 = \sqrt{1 + d^2/h^2} \cdot (h/l_1)$, kan $E_1$ uit formule (3) worden berekend, als $d$, $l_1$, en $h$ gegeven zijn. De factoren $(f)$ waarmee $I_0/h$ moet worden vermenigvuldigd om de waarde van $E_1$ te vinden, kunnen voor een aantal waarden van $d/h$ en $l_1/h$ eens voor al worden uitgerekend en in een tabel vastgelegd.

We hebben nu nog slechts een gedeelte van de lamp in rekening gebracht. De verlichtingssterkte $E_2$, die het deel *2*-$P''$ (lengte $l_2$) in $P$ levert, kan echter op geheel dezelfde wijze berekend worden. Als $d/h$ en $l_2/h$ bekend zijn, vinden we deze uitkomst uit dezelfde tabel als boven vermeld. De totale verlichtingssterkte $E$ in $P$ is nu gelijk aan de som van $E_1$ en $E_2$.

In de tweede plaats beschouwen we het geval dat het vlak door $P$, loodrecht op de as van de lamp, deze snijdt in een punt op het verlengde van de as ($P_1''$ in fig. 1). Nu moet men voor $l_1$ de afstand van $P_1''$ tot *1* nemen en voor $l_2$ die van $P_1''$ tot *2*. Als de verlichtingssterkten die te danken zijn aan de fictieve lampgedeelten $P_1''$-*1* en $P_2''$-*2* weer resp. $E_1$ en $E_2$ worden genoemd, is $E_1 - E_2$ de totale verlichtingssterkte in $P_1$. (Ligt $P_1''$ in fig. 1 aan de andere zijde van de lamp, dan moet deze beschouwd worden als het verschil van de fictieve lampgedeelten $P_1''$-*2* en $P_1''$-*1*.)

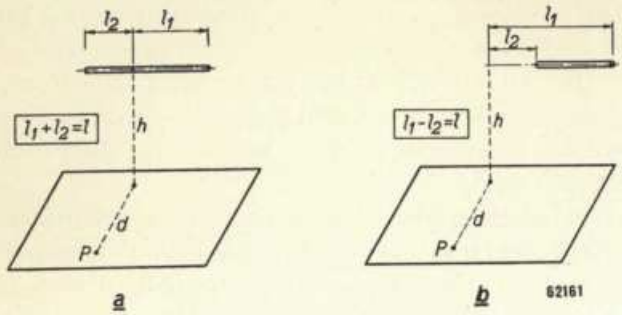
*Tabel I* is de practische uitwerking van deze gedachtegang. Deze tabel maakt het mogelijk op een-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



**Tabel I.** De factoren $f$ voor het berekenen van de horizontale verlichtingssterkte $E$ in een punt $P$ van het werkvlak.




Voor geval ($a$) geldt:

$$E = I_0/h\,[f(d/h, l_1/h) + f(d/h, l_2/h)]$$

en voor geval ($b$):

$$E = I_0/h\,[f(d/h, l_1/h) - f(d/h, l_2/h)].$$

| $l/h$ \ $d/h$ | 0 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,0 | 1,5 | 2 | 3 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,10 | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | — | — |
| 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,14 | 0,10 | 0,08 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | — |
| 0,30 | 0,28 | 0,26 | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | — |
| 0,40 | 0,36 | 0,33 | 0,26 | 0,19 | 0,13 | 0,07 | 0,03 | 0,01 | — |
| 0,50 | 0,43 | 0,40 | 0,32 | 0,23 | 0,16 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | — |
| 0,75 | 0,56 | 0,52 | 0,42 | 0,31 | 0,23 | 0,12 | 0,06 | 0,02 | 0,01 |
| 1,0 | 0,64 | 0,60 | 0,49 | 0,37 | 0,27 | 0,14 | 0,08 | 0,03 | 0,01 |
| 1,5 | 0,72 | 0,68 | 0,56 | 0,44 | 0,33 | 0,18 | 0,11 | 0,04 | 0,01 |
| 2 | 0,75 | 0,71 | 0,59 | 0,47 | 0,36 | 0,21 | 0,12 | 0,05 | 0,01 |
| 5 | 0,78 | 0,74 | 0,63 | 0,50 | 0,39 | 0,24 | 0,15 | 0,07 | 0,02 |
| $\infty$ | 0,79 | 0,74 | 0,63 | 0,50 | 0,39 | 0,24 | 0,16 | 0,08 | 0,03 |

voudige wijze de verlichtingssterkte te berekenen in een punt van het werkvlak, waarvan de ligging door de afstanden $d$ en $l_1$ (resp. $l_2$) is bepaald, als $h$ gemeten en $I_0$ bekend is. Geschiedt de verlichting door een aantal lichtbronnen, gelegen in een of meer vlakken evenwijdig aan het werkvlak, dan wordt de totale verlichtingssterkte in een punt van het werkvlak gevonden door die welke de afzonderlijke lampen leveren bij elkaar te tellen.

### Lamp met armatuur

Als we een overzicht willen verkrijgen van het verloop van de verlichtingssterkte op een horizontaal meetvlak, ligt het voor de hand ons loodvlakken op de as van de lamp te denken en te onderzoeken, hoe de verlichtingssterkte varieert langs de snijlijnen van deze loodvlakken met het meetvlak. Voor zulk een loodvlak is zowel $l_1$ als $l_2$ constant. Men vindt dan de factoren waarmede bij de opeenvolgende punten $I_0/h$ moet worden vermenigvuldigd, door de getallen van een horizontale rij in tabel I (behorende bij de gegeven $l_1/h$) te vermeerderen of te verminderen met de overeenkomstige getallen van een tweede horizontale rij (die van $l_2/h$).

We onderstellen nu, dat de lamp voorzien is van een cylindrische armatuur, even lang als de lamp en zo smal dat het geheel nog als lijnvormig is te beschouwen, en we zullen daarbij aannemen dat lamp en armatuur ieder stralen volgens de wet van Lambert. De aangebrachte armatuur heeft dan tot gevolg dat de eerst gebruikte $I_0$ moet worden vermenigvuldigd met een zekere factor, die nog afhangt van $d/h$.

Om deze factor te vinden denken we ons uit een punt in een plat vlak, loodrecht op de lamp, in iedere richting vectoren uitgezet, evenredig met de $I_0$ van die richting. De verbindingslijn van de uiteinden dezer vectoren is dan voor dit vlak de verdelingskromme van de transversale lichtsterkten $I_0$ in afhankelijkheid van de hoek $\alpha$ [5]). Bij een lamp zonder armatuur is deze kromme een cirkel, want $I_0$ is dan onafhankelijk van $\alpha$. Bij een lichtbron met armatuur kan deze verdelingskromme velerlei gedaante vertonen. In *fig. 2* is een voorbeeld daarvan getekend. De transversale lichtsterkte $I_{0,\alpha}$ in de richting $\alpha$, van de lamp met armatuur, wordt nu voorgesteld door het product $nI_0$, waarbij $I_0$ de transversale lichtsterkte is van de lamp zonder armatuur.

Het spreekt van zelf, dat men het verloop van de factor $n$ in plaats van grafisch ook door een tabel kan weergeven. Is de armatuur asymmetrisch, dan heeft $n$ aan weerszijden van de projectie $1'2'$ van de lamp op het beschouwde horizontale vlak een verschillend verloop. Bij het in fig. 2 getekende voorbeeld vindt men de waarden:

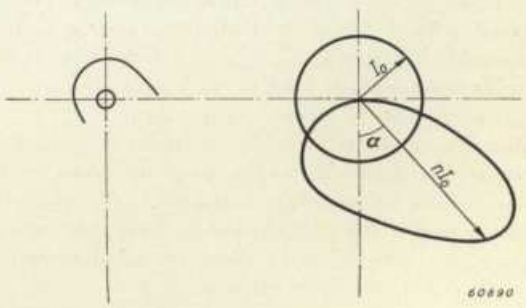



Fig. 2. Rechts: verdelingskromme van de transversale lichtsterkten bij een buisvormige lamp zonder armatuur (cirkel met straal $I_0$), en de overeenkomstige kromme voor een asymmetrische reflector, die links in dwarsdoorsnede is voorgesteld.

[5]) De hier beschreven verdelingskromme moet niet worden verward met het polaire diagram van de lichtverdeling van een puntvormige lichtbron in een meridiaanvlak.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



| $d/h$ | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 71°30′ | 63°30′ | 45° | 0° | 45° | 63°30′ | 71°30′ |
| $n$ | 0 | 0,4 | 1,3 | 1,8 | 3,1 | 2,5 | 1,5 |

Om de verlichtingssterkte op het werkvlak voor een punt in de richting $\alpha$ te vinden, moet de voor een lamp zonder armatuur gevonden verlichtingssterkte worden vermenigvuldigd met de factor $n$ die bij deze richting behoort.

**Een getallenvoorbeeld**

We willen dit artikel besluiten met de toepassing van de beschreven methode op een eenvoudig voorbeeld.

In een lokaal waarvan het plafond en de muren niet reflecteren, bevinden zich aan de zolder twee evenwijdige lichtbronnen *I* en *II*. De eerste bestaat uit een ononderbroken reeks fluorescentielampen TL 25W/33a, vrij opgehangen; de tweede wordt gevormd door twee korte lampen TL 25W/33a met een asymmetrische reflector, waarvan de lichtsterkte-verdelingskromme in fig. 2 is getekend.

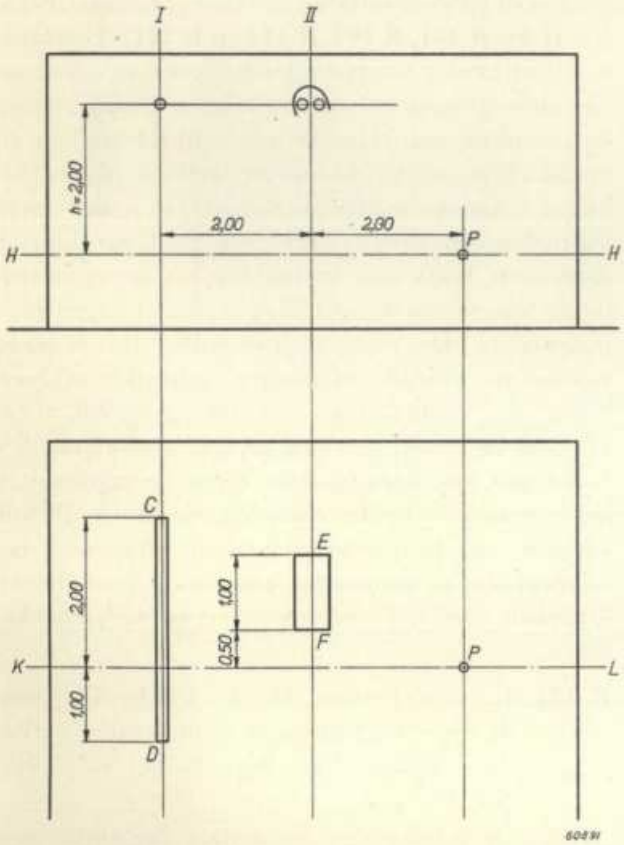



Fig. 3. Situatietekening die de afmetingen van de twee lichtbronnen *I* en *II* (genoemd in het behandelde getallenvoorbeeld) aangeeft alsmede hun plaats ten opzichte van lijn *KL* in het werkvlak *HH*. Gevraagd werd de verdeling van de verlichtingssterkte langs de lijn *KL* te berekenen.

Gevraagd wordt de verlichtingssterkte te bepalen langs een lijn *KL* in een horizontaal vlak *HH* dat zich 2 meter beneden de lichtbronnen bevindt. (Voor de afmetingen der lampen en hun plaats ten opzichte van de lijn *KL* wordt verwezen naar *fig. 3.*)

Voor beide lampen geldt: $I_0 = 115$ cd/m, zodat $I_0/h = 57{,}5$ cd/m² is.

Om de verlichtingssterkte die lamp *I* levert te bepalen, moeten we voor alle punten van *KL* in tabel I $l_C/h = 1$ en $l_D/h = 0{,}5$ stellen, zodat we voor de corresponderende $f_C$ en $f_D$ vinden:

| $d/h$ | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $f_C$ | 0,03 | 0,08 | 0,27 | 0,64 | 0,27 | 0,08 | 0,03 |
| $f_D$ | 0,02 | 0,04 | 0,16 | 0,43 | 0,16 | 0,04 | 0,02 |
| $f_C+f_D$ | 0,05 | 0,12 | 0,43 | 1,07 | 0,43 | 0,12 | 0,05 |

Op dezelfde wijze worden de getallen $f_E$ en $f_F$ voor een der lampen van lichtbron *II* gevonden door $l_E/h = 0{,}75$ en $l_F/h = 0{,}25$ te stellen:

| $d/h$ | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $f_E$ | 0,02 | 0,06 | 0,23 | 0,56 | 0,23 | 0,06 | 0,02 |
| $f_F$ | 0,01 | 0,02 | 0,09 | 0,24 | 0,09 | 0,02 | 0,01 |
| $f_E-f_F$ | 0,01 | 0,04 | 0,14 | 0,32 | 0,14 | 0,04 | 0,01 |
| $n$ | 0 | 0,4 | 1,3 | 1,8 | 3,1 | 2,5 | 1,5 |

De factoren $f_E - f_F$ moeten daarna nog met 2 en met de bij iedere $d/h$ behorende coëfficient $n$ worden vermenigvuldigd.

De verlichtingssterkte in een punt wordt nu gevonden door de verlichtingssterkten die de lichtbronnen *I* en *II* leveren te sommeren. Als voorbeeld beschouwen we punt *P* (fig. 3) op de lijn *KL*. Daar bedraagt de verlichtingssterkte:

$$(0{,}12 + 3{,}1 \cdot 2 \cdot 0{,}14) \cdot 57{,}5 = 57 \text{ lux}.$$

**Samenvatting.** Er wordt een eenvoudige methode besproken waarmede ieder die wel eens te maken heeft met de verlichtingssterkte welke lijnvormige lichtbronnen in een bepaald punt geven, deze kan berekenen. De berekening wordt beperkt tot het bepalen van de verdeling van de verlichtingssterkte in een horizontaal vlak ten gevolge van de directe verlichting door een of meer lijnvormige lichtbronnen die in een hoger gelegen horizontaal vlak, dus bijv. langs de zolder van het lokaal, zijn aangebracht. Het resultaat van de berekeningen wordt in een tabel samengevat. Ook wordt uiteengezet hoe men met de invloed van een armatuur rekening kan houden. Ten slotte wordt de gegeven theorie toegepast op een getallenvoorbeeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voorzover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

**1884:** J. L. H. Jonker en A. J. W. M. van Overbeek: Control of a beam of electrons by an intersecting electron beam (Nature London **164**, 276, 1949, 13 Aug.).

Een bandvormige electronenbundel (100 V), afkomstig van een langwerpige concaaf-cylindrische oxydekathode, wordt gekruist door een tweede bandvormige electronenbundel (16 V). Deze bundel wordt beïnvloed door de ruimtelading van de eerste bundel. Aldus is het mogelijk de electronenstroom $I_2$ in de tweede bundel te doen afnemen van $10^{-5}$ tot $10^{-6}$ A door de potentiaal $V_{g1}$ van het stuurrooster van de eerste bundel te variëren. Als de anode van de tweede bundel vervangen wordt door een secundair emitterend oppervlak (multiplicator) kan men steilheden van vele ampères per volt realiseren bij anodestromen van de orde van 10 mA.

**1885:** C. J. Bakker: Valve noise and transit time (Wireless Eng. **26**, 277, 1949, Aug.).

Antwoord op een critiek van Campbell, Francis en James en van Houlding (Wireless Eng. **25** (1948), p. 148 resp. 372) betreffende een artikel van de schrijver uit 1941 (Physica **8**, p. 23). De lezer wordt ook verwezen naar een Letter to the Editor in Wireless Eng. van F. L. H. M. Stumpers (deze overzichten No. **1886**).

**1886:** F. L. H. M. Stumpers: Measurements of induced grid noise (Wireless Eng. **26**, 277-278, 1949, Aug.).

Korte beschrijving van een opstelling volgens Bakker (Physica **8**, 23, 1941) voor het meten van het geruis dat door influentie op het rooster veroorzaakt wordt, en mededeling van enkele resultaten van metingen in het frequentiegebied 20-100 MHz. De metingen stemmen bevredigend overeen met de theorie van Bakker.

**R 122:** W. Nijenhuis: A note on a generalized Van der Pol equation (Philips Res. Rep. **4**, 401-406, 1949, No. 6).

Het vraagstuk van het oplossen van de gegeneraliseerde vergelijking van Van der Pol, $\ddot{v}-\varepsilon(1-2\beta v-v^2)\dot{v}+v=0$, is gelijkwaardig met dat van het oplossen van een gewone vergelijking van Van der Pol ($\beta=0$), echter met een constant rechter lid. Voor grote waarden van $\varepsilon$ en $\beta$ wordt een eenvoudige benadering gevonden voor de „cycle limite", waaruit volgt dat de verhouding van de maximale ordinaten in positieve en negatieve richting de waarde 3 : 1 niet kan overschrijden.

**R 123:** J. A. Haringx: On highly compressible helical springs and rubber rods, and their application for vibration-free mountings, VI (Philips Res. Rep. **4**, 407-448, 1949, No. 6).

In dit artikel worden enkele uitvoeringsvormen van trillingsvrije opstellingen behandeld, in het bijzonder een dynamische trillingsdemper met hulpmassa, ondersteund door schroefveren, en een eenvoudige opstelling zonder hulpmassa, ondersteund door rubberstaven. De ontwerpen zijn geheel gebaseerd op de resultaten der voorgaande artikelen (zie **R 94, R 101, R 109, R 113** en **R 121**). Hierbij is in het bijzonder aandacht geschonken aan constructies die tegemoet komen aan eisen ten aanzien van de scheiding der verschillende vrijheidsgraden. In de inleiding wordt uiteengezet welke storende trillingen kunnen worden verwacht en welke extra voordelen een grote waarde van het logarithmisch decrement heeft met betrekking tot de vrije trillingen van een op de opstelling geplaatst ongedempt instrument. De typische verschillen die bestaan tussen als verende elementen gebruikte schroefveren en rubberstaven worden genoemd. O.a. vereisen de laatste een veel grotere massa voor het verkrijgen van dezelfde lage eigen frequentie van het systeem. Verder worden de verschillende verende en dempende elementen uitgebreid behandeld, om te komen tot een aantal formules en grafieken, die het ontwerpen ervan vergemakkelijken.

**R 124:** R. Loosjes en H. J. Vink: The conduction mechanism in oxide-coated cathodes (Philips Res. Rep. **4**, 449-475, 1949, No. 6).

Voor de inhoud van dit artikel vergelijke men deze overzichten No. **1808*** en Philips techn. T. **11**, 275-282, 1949, No. 9.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!